

**UNIVERSIDAD DE CUENCA**



**FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE  
CONCRETOS AUTOCOMPACTANTES DE ALTAS PRESTACIONES CON LA  
INCLUSIÓN DE FIBRAS PLÁSTICAS NORMALIZADAS Y RECICLADAS**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA  
OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**AUTORES:**

JOSÉ ANTONIO ABAD GONZÁLEZ

C.I. 0104806625

JORGE MIGUEL ROMERO LOYOLA

C.I. 0104464607

**DIRECTOR:**

ING. JORGE FERNANDO MOSCOSO FERNÁNDEZ SALVADOR M.Sc.

C.I. 0104429733

Cuenca – Ecuador

2016

**Resumen:**

El concreto autocompactante (CAC) se define como un concreto capaz de fluir y compactarse, por efecto de su propio peso, en el interior de moldes densamente armados. El trabajo de titulación “Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de concretos autocompactantes de altas prestaciones con la inclusión de fibras plásticas normalizadas y recicladas” tiene por objetivo incorporar fibras plásticas, recicladas y normalizadas, a CAC para evaluar y comparar sus propiedades físicas y mecánicas, en estado fresco y endurecido, enfocados a la obtención de la dosificación que de mejor comportamiento en función de las propiedades analizadas.

Con el fin de cumplir los objetivos planteados se utilizó como herramienta un diseño de experimentos, en el cual interviene dos factores y tres niveles, generando un diseño factorial  $3^k$ . La dosificación del CAC utilizado sin inclusión de fibras, surgió a partir de una dosificación existente de un concreto de alta resistencia, variando únicamente la relación A/C y la cantidad de aditivo. En total, 9 dosificaciones resultantes del diseño factorial fueron realizadas, cada una con diferente cantidad de fibras plásticas, ya sea comerciales, recicladas o su combinación.

Las propiedades mecánicas analizadas en los CAC fueron las siguientes: resistencia a compresión simple, módulo de elasticidad, relación de Poisson, asentamiento, velocidad de propagación de onda y módulo de ruptura. Los resultados obtenidos fueron analizados por análisis de varianza ANOVA simple y multifactorial, con el fin de saber si existe o no variación estadísticamente significativa para cada propiedad estudiada. Adicionalmente, los resultados fueron representados en superficies de respuesta.

**Palabras Clave:** Concreto autocompactante, propiedades mecánicas, propiedades físicas, fibras plásticas, fibras recicladas, fibras normalizadas, diseño experimental, diseño factorial  $3^k$ , superficie de respuesta.

**Abstract:**

Self-compacting concrete (SCC) is defined as concrete that is flowable and compacted by the effect of its own weight inside densely reinforced molds. The thesis "Evaluation of physical and mechanical properties of high performance self-compacting concrete with the inclusion of standard and recycled plastic fibers" aims to merge SCC and plastic fibers. These could be recycled and standardized fibers. They are added to self-compacting concrete with the intention to check and compare their physical and mechanical properties in fresh and hardened state. Focused on obtaining the best dosage by the behavior depending on the properties analyzed.

In order to meet the goals an experimental design was used as a tool. It involved two factors at three levels generating a 3k factorial design. The dosage used as baseline SCC (not including fiber) rose from an existing dosage of a high-strength concrete. Varying only the W / C and the amount of additive. Nine different dosages are proposed as the result of the factorial design. Every dosage with different amount of plastic fibers whether commercial, recycled or both.

The following mechanical properties in SCC: compressive strength, modulus of elasticity, Poisson's ratio, settlement, ultrasonic propagation speed and modulus of rupture were analyzed. After analyzing the results with an analysis of variance and multivariate ANOVA to find if statistically significant variance exists or not. Each property studied the influence of the type and amount of fiber. Additionally, experimental results are represented in response surfaces.

**Keywords:** Self compacting concrete, mechanical properties, physical properties, plastic fibers, recycled fibers, standard fibers, experimental design, factorial design 3k, response surface.



## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN:	16
Objetivo General:	20
Objetivos específicos:	20
CAPÍTULO I: MATERIALES	21
1.1. Agregados:	21
1.1.1. Densidades y absorción:	22
1.1.2. Humedad:	25
1.1.3. Granulometría:	26
1.1.4. Tamaño máximo nominal (TMN) del agregado:	29
1.1.5. Forma:	30
1.1.6. Textura superficial:	31
1.2. Cemento:	31
1.3. Aditivo:	32
1.4. Agua:	32
1.5. Fibras	32
1.5.1. Fibras plásticas Sika Fiber Force PP/PE-700/55:	33
1.5.2. Fibras plásticas recicladas PET	35
CAPÍTULO II: DISEÑO DE EXPERIMENTOS	38
2.1. Definición de un ensayo experimental	38
2.2. Delimitación del caso de estudio	40
2.3. Elección de variables	40
2.4. Factores	41
2.4.1. Factores y niveles	41
2.4.2. Factores controlables y de bloqueo	41
2.4.3. Factores no controlables	42
2.5. Diseño Factorial	43
2.5.1. Diseño factorial 3k	43
CAPÍTULO III: DOSIFICACIÓN Y MEZCLADO DE CONCRETO	46
3.1. Dosificación del CAC Base	46
3.2. Dosificación de CAC con inclusión de Fibras	47
3.3. Proceso estandarizado de mezclado	48
CAPÍTULO IV: PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL CAC	49



---

4.1.	En estado Fresco .....	49
4.1.1.	Ensayo de escurrimiento .....	49
4.1.2.	Viscosidad .....	50
4.1.3.	Capacidad de paso .....	51
4.1.4.	Resistencia a la segregación.....	52
4.1.5.	Contenido de fibras en mezcla fresca .....	52
4.2.	Estado endurecido .....	52
4.2.1.	Resistencia a compresión simple .....	53
4.2.2.	Módulo de Ruptura .....	55
4.2.3.	Módulo de elasticidad.....	58
4.2.4.	Relación de Poisson.....	63
4.2.5.	Densidad .....	64
4.2.6.	Velocidad de propagación de ultrasonido .....	65
CAPÍTULO V: RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....		67
5.	Análisis estadístico de la variación del concreto en estado fresco y endurecido	67
5.1.	Diseño completamente al azar .....	67
5.2.	ANOVA simple .....	68
5.2.1.	Asentamiento .....	70
5.2.2.	Módulo elástico por deformación .....	71
5.2.3.	Módulo de ruptura .....	72
5.2.4.	Resistencia a compresión .....	73
5.2.5.	Velocidad de Onda.....	74
5.3.	ANOVA multifactorial.....	75
5.3.1.	Análisis de Varianza para Resistencia a Compresión Simple.....	76
5.3.2.	Análisis de Varianza para Módulo Elasticidad .....	77
5.3.3.	Análisis de Varianza para Relación Poisson .....	77
5.3.5.	Análisis de Varianza para Módulo de Ruptura.....	79
5.4.	Gráficos de superficie de respuesta .....	79
5.4.1.	Módulo de Ruptura .....	80
5.4.2.	Asentamiento $T_{50}$ .....	80
5.4.3.	Resistencia a compresión .....	81
5.4.4.	Módulo de elasticidad.....	82
5.4.5.	Relación de Poisson.....	83

---



5.5. Identificación del tratamiento de mejor desempeño.....	84
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	86
REFERENCIAS .....	91
ANEXOS .....	94
Anexo 1: Resultados Resistencia a compresión .....	94
Anexo 2: Resultados Módulo de Ruptura .....	96
Anexo 3: Resultados Módulo de Elasticidad.....	97
Anexo 4: Gráficas de Esfuerzo – Deformación de cada mezcla .....	101
Anexo 5: Resultados Velocidad de Propagación de Onda .....	106
Anexo 6: Resultados Relación de Poisson .....	107

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES:

Ilustración 1. Agregado fino. ....	22
Ilustración 2. Curva granulométrica árido fino triturado. ....	27
Ilustración 3. Curva granulométrica árido fino combinado. ....	28
Ilustración 4. Curva granulométrica árido grueso. ....	29
Ilustración 5. Agregado grueso. ....	31
Ilustración 6. Cemento utilizado. ....	31
Ilustración 7. Aditivo viscocrete 2100. ....	32
Ilustración 8. Fibras Sika Fiber Force PP/PE-700/55. ....	34
Ilustración 9. Fibras recicladas. ....	35
Ilustración 10. Fibras recicladas (dimensiones). ....	36
Ilustración 11. Experimento 3k, espacio muestral. ....	44
Ilustración 12. Ensayo escurrimiento. ....	50
Ilustración 13. Probetas cilíndricas durante el curado. ....	53
Ilustración 14. Probetas prismáticas previas a ensayo. ....	53
Ilustración 15. Ensayo resistencia compresión simple. ....	54
Ilustración 16. Ensayo módulo de ruptura. ....	56
Ilustración 17. Esquema de ensayo para módulo de ruptura. (cm). ....	56
Ilustración 18. Fractura en vigueta con la inclusión de fibras comerciales. ....	58
Ilustración 19. Ensayo de Módulo de Elasticidad a probeta cilíndrica. ....	60
Ilustración 20. Ensayo de velocidad de onda. ....	66
Ilustración 21. Medias con bordes para asentamiento. ....	71
Ilustración 22. Gráfico de caja y bigotes para asentamiento. ....	71
Ilustración 23. Gráfico de medias con bordes para módulo elástico. ....	72
Ilustración 24. Gráfico de caja y bigotes para módulo elástico. ....	72
Ilustración 25. Gráfico de medias con bordes para módulo de ruptura. ....	73
Ilustración 26. Gráfico de caja y bigotes para módulo de ruptura. ....	73
Ilustración 27. Gráfico de medias con bordes para resistencia a compresión. ....	74
Ilustración 28. Gráfico de caja y bigotes para resistencia a compresión. ....	74
Ilustración 29. Gráfico de medias con bordes para velocidad de onda. ....	75
Ilustración 30. Gráfico de caja y bigotes para velocidad de onda. ....	75
Ilustración 31. Gráfico de medias para asentamiento T <sub>50</sub> . ....	78
Ilustración 32. Superficie de respuesta para módulo de ruptura. ....	80
Ilustración 33. Gráfico de contornos para módulo de ruptura. ....	80
Ilustración 34. Superficie de respuesta para asentamiento T <sub>50</sub> . ....	81
Ilustración 35. Gráfica de contornos para asentamiento T <sub>50</sub> . ....	81
Ilustración 36. Superficie de Respuesta para resistencia a compresión. ....	82
Ilustración 37. Gráfica de contornos para resistencia a compresión. ....	82
Ilustración 38. Superficie de Respuesta para Módulo de elasticidad por deformación. ....	83
Ilustración 39. Gráfica de contornos para los Módulos de Elasticidad por deformación. ....	83
Ilustración 40. Superficie de Respuesta para Relación de Poisson. ....	84
Ilustración 41. Gráfica de contornos para Relación de Poisson. ....	84



## ÍNDICE DE TABLAS:

Tabla 1. Factores para cálculo de densidades. ....	22
Tabla 2. Factores para cálculo de densidades. ....	23
Tabla 3. Factores para cálculo de densidades. ....	25
Tabla 4. Granulometría Arena Triturada .....	26
Tabla 5. Granulometría Agregado Fino Combinado. ....	27
Tabla 6. Granulometría Agregado Grueso. ....	28
Tabla 7. Propiedades Fibras Sika Fiber Force PP/PE-700/55. ....	34
Tabla 8. Propiedades Fibras Recicladas. ....	36
Tabla 9. Propiedades Químicas Fibras Recicladas. ....	36
Tabla 10. Cantidad de Fibras por tratamiento. ....	43
Tabla 11. Estadísticos para tamaño de muestra. ....	44
Tabla 12. Orden de hormigonado de tratamientos. ....	45
Tabla 13. Dosificación por lote para hormigonado. ....	47
Tabla 14. Dosificación por metro cúbico de hormigonado. ....	47
Tabla 15. Relaciones para concretos autocompactantes. ....	47
Tabla 16. Cantidades de fibras por tratamiento .....	47
Tabla 17. Asentamiento por clase de concreto autocompactante. ....	49
Tabla 18. Viscosidad por asentamiento del concreto. ....	50
Tabla 19. Asentamiento $T_{50}$ para cada replica por tratamiento. ....	51
Tabla 20. Medias de conteos de fibras por tratamiento .....	52
Tabla 21. Media resistencia a compresión por tratamiento. ....	55
Tabla 22. Medias del módulo de ruptura por tratamiento. ....	57
Tabla 23. Medias de módulo elástico por tratamiento. ....	59
Tabla 24. Módulos de Elasticidad y $f'_c$ obtenidos en el laboratorio de la Universidad de Cuenca. ....	60
Tabla 25. Módulos de Elasticidad y $f'_c$ obtenidos en el laboratorio Labscon. ....	60
Tabla 26. Medias del módulo elástico corregido por factor de corrección por tratamiento. ....	60
Tabla 27. Medias de velocidad de ultrasonido por tratamiento. ....	61
Tabla 28. Medias del módulo elástico calculado con la ecuación ACI por tratamiento. ....	62
Tabla 29. Relación de Poisson por tratamiento. ....	63
Tabla 30. Medias de densidad por tratamiento. ....	65
Tabla 31. Caracterización del concreto por velocidad de ultrasonido. ....	65
Tabla 32. Medias de velocidad ultrasonido por tratamiento. ....	66
Tabla 33. Resumen de las propiedades de los concretos autocompactantes. ....	67
Tabla 34. Tratamientos analizados. ....	67
Tabla 35. Análisis ANOVA. ....	69
Tabla 36. Resumen análisis ANOVA para asentamiento $T_{50}$ . ....	70
Tabla 37. Resumen análisis ANOVA para módulo elástico. ....	71
Tabla 38. Resumen análisis ANOVA para módulo de ruptura. ....	72
Tabla 39. Resumen análisis ANOVA para resistencia a compresión. ....	73
Tabla 40. Resumen análisis ANOVA para velocidad de onda. ....	74





Tabla 41. ANOVA multifactorial para resistencia a compresión. ....	76
Tabla 42. ANOVA multifactorial para módulo de elasticidad. ....	77
Tabla 43. ANOVA multifactorial para relación de Poisson. ....	77
Tabla 44. ANOVA multifactorial para asentamiento $T_{50}$ . ....	78
Tabla 45. ANOVA multifactorial para módulo de ruptura. ....	79
Tabla 46. Tabla tratamiento de mejor desempeño por propiedad. ....	84



Yo, José Antonio Abad González, autor de la tesis “EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE CONCRETOS AUTOCOMPACTANTES DE ALTAS PRESTACIONES CON LA INCLUSIÓN DE FIBRAS PLÁSTICAS NORMALIZADAS Y RECICLADAS”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 13 de octubre del 2016



José Antonio Abad González

C.I: 0104806625



Yo, Jorge Miguel Romero Loyola, autor de la tesis "EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE CONCRETOS AUTOCOMPACTANTES DE ALTAS PRESTACIONES CON LA INCLUSIÓN DE FIBRAS PLÁSTICAS NORMALIZADAS Y RECICLADAS", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 13 de octubre del 2016

---

Jorge Miguel Romero Loyola

C.I: 0104464607



Yo, José Antonio Abad González, autor de la tesis "EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE CONCRETOS AUTOCOMPACTANTES DE ALTAS PRESTACIONES CON LA INCLUSIÓN DE FIBRAS PLÁSTICAS NORMALIZADAS Y RECICLADAS", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 13 de octubre del 2016

José Antonio Abad González

C.I: 0104806625



Yo, Jorge Miguel Romero Loyola, autor de la tesis "EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE CONCRETOS AUTOCOMPACTANTES DE ALTAS PRESTACIONES CON LA INCLUSIÓN DE FIBRAS PLÁSTICAS NORMALIZADAS Y RECICLADAS", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 13 de octubre del 2016

Jorge Miguel Romero Loyola

C.I: 0104464607



## DEDICATORIA

A Dios por permitirme lograr uno de mis objetivos. A mis padres Patricio y Elsa, por su apoyo y amor incondicional, sus consejos, valores, principios y motivación en todo momento, quienes han sido y serán siempre mi ejemplo de sacrificio, dedicación y humildad.

A mis hermanos Andrés y María José, mi otra mitad, quienes han sido siempre mi inspiración.

A mis abuelitos Juan y Dora, quienes me han brindado su infinito amor y han creído siempre en mí. De igual manera, a mi abuelita Sarita (†) por todo el amor, cariño y enseñanzas entregadas.

A todas las personas quienes han sido parte esencial de mi vida. A mi familia y amigos, quienes me han entregado su alegría y fuerzas necesarias para continuar durante toda mi carrera. A Jorge, mi amigo y compañero, por lo vivido y compartido, así como sus enseñanzas, durante toda la carrera universitaria.

José

A Dios por su infinita bondad, amor y por haberme prestado a mis padres Edwin y Alexandra por su incondicional apoyo, quienes fueron los pilares principales para permitirme cumplir una de mis metas y verme llegar a ser la persona que soy.

A mis hermanos Geovanny y Jessica por sus consejos y aliento. A mi sobrina Sofía quien me saca una sonrisa en el día más pesado.

A mis abuelos Jorge, Piedad, Miguel (†) y Argentina por todas sus enseñanzas y valores transmitidos.

A todas esas personas quienes han formado parte de mi vida durante esta larga etapa que ahora llega a su fin. En especial a mis amigos con quienes hemos compartido mucho, dentro y fuera de la vida universitaria. A José mi compañero durante la investigación por lo que hemos llegado a compartir y todo lo que me ha enseñado.

A Nicole por la fuerza y cariño brindado para la realización de este proyecto y lograr este objetivo.

Jorge



## AGRADECIMIENTO

Tras concluir una dura y hermosa etapa en nuestras vidas, llena de aprendizajes y logros, agradecemos de manera muy especial a nuestros padres por su apoyo y amor incondicional.

Tenemos un profundo agradecimiento al Ing. Jorge Moscoso, tutor y gran amigo, por su apoyo, consejos, conocimiento y orientación durante la ejecución de este proyecto de investigación.

Agradecemos sinceramente a nuestros amigos y compañeros, Julio y Diego, quienes han sido parte primordial de nuestro equipo de trabajo, consiguiendo logros y alegrías durante nuestra vida universitaria y fuera de ella.

Nuestro sincero agradecimiento a los ingenieros Fernando Zalamea, Alfredo Vázquez y Vladimiro Tobar por su ayuda y sugerencias en la elaboración de esta investigación.

De igual modo queremos reconocer la ayuda brindada por los laboratoristas Stalin Cabrera y Edison Castillo, gracias a quien se logró culminar a tiempo las actividades dentro del Laboratorio de Suelos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca.

Asimismo, expresamos nuestra gratitud al Ing. Pablo Vélez y al laboratorio Labscon, quien nos brindó su ayuda y tiempo en la realización de ciertos ensayos.

## INTRODUCCIÓN:

Grandes cantidades de residuos sólidos aprovechables, producidos por las industrias y la sociedad de consumo, son desechados, desperdiciados y depositados en rellenos sanitarios diariamente, reduciendo su vida útil. Los altos costos por disposición final del material aprovechable generan grandes impactos económicos y ambientales (Angarita, 2009). Tras la creación del Impuesto Redimible en el 2012 a las botellas plásticas no retornables, según el Ministerio del Ambiente (MAE), en el Ecuador en el mismo año se produjeron 1 406 millones de botellas, de las cuales se lograron recuperar 511 millones de los embotelladores y 624 millones de los centros de acopio y recicladores, logrando una recolección total de 1 136 millones de botellas de Polietileno Tereftalato (PET). Hasta ese año, la recolección máxima fue del 30% en 2011. El reciclaje de materiales disponibles en el medio, y su reutilización directamente relacionado con su desperdicio y mal uso, es considerado muy importante, por la necesidad de generar desarrollo sustentable. La presente investigación busca la adición de fibras plásticas de Polietileno Tereftalato (PET) recicladas, fibras de polipropileno de alta densidad normalizadas comerciales, y su mezcla a la dosificación de concretos autocompactantes (CAC). Se utilizará como fibras recicladas botellas vacías de PET de bebidas como gaseosas y refrescos, y fibras normalizadas comerciales Sika Fiber Force PP/PE-700/55 producidas por la empresa Sika.

El uso de fibras para fortalecer materiales menos resistentes a tensión que a compresión se remonta a tiempos ancestrales. La paja fue utilizada para reforzar los ladrillos de arcilla cocidos al sol, y la crin de caballo se ha utilizado para reforzar las molduras de yeso. En nuestro medio, históricamente se han utilizado fibras para reforzar elementos de mampostería y estructura en viviendas construidas de adobe, ladrillo de arcilla y yeso (ACI Comite 544, 2002). Los primeros estudios teóricos de concreto reforzado con fibras fueron realizados en la década de 1960, basados principalmente en el comportamiento de concretos reforzados con fibras de acero (Bentur, Arnon; Mindess, 2007), con el objetivo de contar con un material estructural moldeable, homogéneo e isotrópico. Desde entonces, las fibras metálicas fueron las más comúnmente usadas en concretos



reforzados con fibras; sin embargo, su uso en concretos está siendo reemplazado por fibras sintéticas, como las de polipropileno. El concreto es uno de los materiales artificiales de construcción más usados en nuestro medio y un rubro significativo en el diseño, proyección y ejecución de obras civiles.

Las propiedades mecánicas de concretos reforzados con fibras metálicas y no metálicas ya han sido estudiadas (Sivakumar & Santhanam, 2007), siendo las características, propiedades y beneficios de estas fibras conocidas. Sin embargo, en nuestro medio se ha investigado poco la influencia de fibras recicladas en concretos. Se conoce que la adición de fibras plásticas comerciales normalizadas al concreto reduce la fisuración por retracción e impide su propagación, así como mantiene la trabajabilidad y aumenta el índice de tenacidad del concreto, como principales ventajas (Qian & Stroeven, 2000). La presente investigación estudia y compara la variación de ciertas propiedades físicas y mecánicas del CAC reforzado por la adición de fibras plásticas de PET recicladas, fibras de polipropileno de alta densidad comerciales y la mezcla de estos dos tipos de fibra. Se adicionará las cantidades de 0 kg, 2.25 kg y 4.5 kg por metro cubico de concreto de cada tipo de fibra a la dosificación de CAC base, según el tipo de dosificación, además de obtener la combinación óptima dentro del espacio experimental. Nuestra hipótesis de inicio sostiene que: “se obtendrá una disminución significativa en el módulo de elasticidad, así como la disminución máxima de un 10% de la resistencia a compresión del concreto endurecido a los 28 días, entre el CAC base comparado con los concretos con la adición de fibras recicladas, comerciales y la mezcla de ambas.”

Como inicio del proceso se realizó un minucioso estudio de las características y propiedades de los materiales necesarios para la confección de los CAC según la normativa American Society of Testing Materials (ASTM), principal referente de la norma ecuatoriana INEN. Los materiales usados en la fabricación de estos concretos son:

- agregado grueso de tamaño máximo nominal de 3/8”,
- agregado fino natural triturado y arena de colma fina distribuida por la casa comercial Sika.

- Cemento Portland Holcim tipo GU, como cementante.
- Agua potable distribuida a la ciudad de Cuenca por ETAPA.
- Aditivo Superplastificante Viscocrete 2100, distribuido por la casa comercial Sika.
- Fibras Plásticas Sika Fiber Force PP/PE-700/55, distribuidas por la casa comercial Sika.
- Fibras plásticas de PET recicladas.

Las fibras recicladas han sido caracterizadas y homogeneizadas mediante un control de calidad exhaustivo con el fin de validar la investigación.

Una vez establecidas las características y propiedades de los materiales, se procedió con la elaboración del diseño estadístico experimental, identificando inicialmente los niveles y factores, siendo estos respectivamente 3 cantidades de fibras (0 kg, 2.25 kg y 4.5 kg), y dos tipos de fibras (fibras recicladas y comerciales), obteniendo un diseño factorial  $3^k$  ( $3^2$ ) (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2008). Las diferentes dosificaciones resultantes de las combinaciones obtenidas por el diseño factorial  $3^k$ , variando los porcentajes de volúmenes de fibras, dará como resultado 9 diferentes tipos de dosificaciones o tratamientos (Aymar, 2007).

Se estudió el efecto de los factores antes mencionadas, sobre las variables respuesta. El análisis de varianza ANOVA se empleó para estudiar el comportamiento de las variables respuesta. Se podrá predecir el comportamiento de la variable respuesta bajo cualquier combinación de niveles de los factores dentro del espacio experimental, generando una superficie de respuesta que represente el comportamiento del caso de estudio planteado.

El número de repeticiones de cada mezcla, o tratamiento, se determinó en base a 79 probetas de la mezcla Base de CAC confeccionadas anteriormente. De estas se obtuvo la resistencia media, desviación estándar y varianza, asumiendo un error máximo para un nivel de confianza del 95%, se determinó el tamaño muestral por tratamiento.

Se definió la dosificación de la mezcla utilizada como mezcla base. Una vez definida la mezcla base se determinó la dosificación de CAC reforzados con fibras plásticas normalizadas y fibras recicladas, en sus respectivos porcentajes.

Una vez determinado las dosificaciones, se elaboraron dos probetas cilíndricas y una vigueta para cada tratamiento o repetición de las 9 dosificaciones de CAC obtenidas a través del diseño factorial, de dimensiones normadas por la norma ASTM. En total, se realizaron 52 probetas de 10cm de diámetro por 20cm de alto cilíndricas y 27 viguetas de 15cm de alto por 15cm de ancho y 53.5 cm de largo.

Con el fin de obtener las propiedades del CAC, se realizaron diversos ensayos, tanto en estado fresco como endurecido. En estado fresco del concreto, se analizó el contenido de fibras, la viscosidad y la extensión del flujo. Una vez endurecido el CAC, se ensayó las probetas cilíndricas y las viguetas a los 28 días de edad, con el fin de obtener la resistencia a compresión simple, el módulo de ruptura, módulo de elasticidad, relación de Poisson, densidad y velocidad de propagación de onda mediante ultrasonido. Todos los ensayos se adecuaron a la normativa ASTM.

Se llevó un control de datos y resultados a partir de los ensayos antes mencionados. Los datos obtenidos, al ser analizados estadísticamente, proporcionan evidencias objetivas para responder las interrogantes planteadas y validar la investigación (Montgomery, 2011). Estos resultados servirán para generar indicadores de importancia, obteniendo una comparación válida de las propiedades de los diferentes tipos de CAC, estableciendo beneficios e inconvenientes, así como sus posibles usos en diferentes ámbitos de la construcción.

En esta perspectiva, el presente estudio pretende conocer el comportamiento del CAC con la inclusión de fibras plásticas recicladas y normalizadas, realizando diferentes ensayos, tanto en estado fresco como endurecido, así también desarrollar un concreto autocompactante capaz de ser fabricado y empleado en el sector constructivo ecuatoriano. Se busca confeccionar un CAC de mejor comportamiento y características mecánicas que un CAC convencional, tanto en estado fresco como endurecido.

Mediante esta investigación se busca generar conocimiento acerca de CAC reforzados con fibras recicladas, con la incorporación de materiales asequibles en cualquier parte del país y del mundo, en la elaboración del concreto. Además, se establece un punto de partida para futuros estudios en temas relacionados.

### **Objetivo General:**

Evaluar y comparar las propiedades físicas y mecánicas de concretos autocompactantes con la inclusión de fibras plásticas, recicladas y normalizadas, enfocados en la obtención de la dosificación que mejor se comporte en función de las propiedades obtenidas, favorable mecánicamente para la construcción.

### **Objetivos específicos**

- Caracterizar las propiedades físicas y mecánicas del agregado grueso y fino mediante ensayos normalizados.
- Determinar las propiedades geométricas, mecánicas y físicas de las fibras plásticas normalizadas y recicladas, así como reciclar y reutilizar desechos provenientes de botellas de PET generadas por consumo de bebidas.
- Determinar las propiedades físicas y mecánicas del concreto base, así como de los concretos reforzados con fibras plásticas recicladas y normalizadas, mediante la elaboración de probetas cilíndricas y viguetas.
- Evaluar las propiedades del CAC en estado fresco y endurecido mediante un análisis de varianza (ANOVA).
- Aplicar el diseño de experimentos para la obtención de la dosificación óptima de acuerdo a la propiedad del CAC estudiada, mediante un diseño factorial 3k, representado en gráficos de superficie de respuesta

---

## CAPÍTULO I: MATERIALES

Los materiales necesarios para la fabricación de concretos autocompactantes (CAC) son: agregado grueso, agregado fino, agua y cemento, mismos compuestos utilizados para la fabricación de concretos convencionales, diferenciándose en su dosificación. Además, se adiciona un aditivo reductor de agua de alto rango, fibras plásticas de la casa comercial SIKA y fibras recicladas obtenidas de botellas de PET según las dosificaciones propuestas. Tanto el árido grueso como el fino (arena natural triturada), son áridos de la zona y fueron obtenidos de la cantera “Servicios Materiales y Construcciones Cordero Vintimilla S.A.”, ubicada en la Panamericana Norte kilómetro 8.5 vía a Llacao, sector Capulispamba, Cuenca, Azuay. El segundo árido fino utilizado, arena de colma fina de casa SIKA, fue obtenida a través de distribuidores autorizados de dicha empresa.

### 1.1. Agregados:

Los áridos empleados en la fabricación del concreto están constituidos por partículas densas, duras y de forma adecuada. Estas partículas son Inertes y no reactivas con el álcali del cemento. Adicionalmente, en el árido grueso se le realizó un proceso de lavado minucioso, con el fin de eliminar partículas de arcilla, limo y materia orgánica, residuos de su trituración y transporte.

En el presente trabajo se utilizó como agregado fino arena natural triturada y arena de colma fina, distribuida por la casa SIKA. Se denomina como agregado fino a las partículas pasantes al tamiz No. 4 y retenidas en el tamiz No. 200, según la normativa (ASTM D 2487, 2011). El agregado fino en un CAC tiene un papel muy importante en lo que es trabajabilidad y estabilidad de la mezcla. La granulometría del agregado fino debe ser tal que tanto la trabajabilidad como la estabilidad se mantengan. Para un concreto autocompactante, el requerimiento de agregado fino en su máxima proporción en función del total de agregados no debe superar el 70% (Lanka, 2012).



*Ilustración 1. Agregado fino.*

Por otra parte, el agregado grueso empleado en la mezcla fue roca triturada o grava, de tamaño máximo nominal y tamaño máximo 3/8". La piedra triturada, debido a su forma y textura, genera mayor trabazón mecánica entre las partículas angulosas y la pasta formada por cemento, agua y el agregado fino, produciendo finalmente, mayor resistencia mecánica a compresión (Romo Proaño, 2008). Según la normativa (ASTM D 2487, 2011), se denomina como agregado grueso a las partículas pasantes el tamiz de 3" (75 mm) y retenido en el tamiz No.4 (4.75 mm)

#### **1.1.1. Densidades y absorción:**

##### **Densidades y absorción del agregado fino:**

Estas propiedades del agregado fino fueron determinadas siguiendo las indicaciones de la norma (ASTM C 128, 2004). Tal como indica la norma, se debe sumergir en agua por  $24 \pm 4$  horas una muestra de agregado fino, previamente secado, con el fin de llenar los poros con agua. Al retirar el agua de la muestra se seca el agua superficial y se determina su masa. Posteriormente, la muestra se coloca en una probeta graduada y se determina su volumen. Finalmente, la muestra se seca y se obtiene su masa. Para determinar los valores de densidad promedio, densidad relativa y absorción, es necesario conocer los siguientes valores:

- Arena natural:

*Tabla 1. Factores para cálculo de densidades.*

Factor	Descripción	Valor
A	Masa en aire de la muestra seca al horno (g)	484
B	Masa del picnómetro lleno con agua (g)	4945
C	Masa del picnómetro lleno con muestra y agua (g)	5252
S	Masa de la muestra en estado SSS (g)	500

Densidad relativa seca:

$$Densidad\ relativa\ seca = \frac{A}{(B + S - C)} = 2.51 \quad (1)$$

Densidad relativa SSS:

$$Densidad\ relativa\ SSS = \frac{S}{(B + S - C)} = 2.59 \quad (2)$$

Densidad relativa aparente:

$$Densidad\ relativa\ aparente = \frac{A}{(B + A - C)} = 2.73 \quad (3)$$

Densidad seca:

$$Densidad\ seca = \frac{997.5 A}{(B + S - C)} = 2501.50 \frac{kg}{m^3} \quad (4)$$

Densidad SSS:

$$Densidad\ SSS = \frac{997.5 B}{(B + S - C)} = 2584.20 \frac{kg}{m^3} \quad (5)$$

Densidad aparente:

$$Densidad\ aparente = \frac{997.5 A}{(B + A - C)} = 2727.63 \frac{kg}{m^3} \quad (6)$$

Absorción:

$$\% Absorción = \frac{(S - A)}{A} \times 100 = 3.31 \quad (7)$$

- Arena combinada (arena natural con arena de colma fina):

Tabla 2. Factores para cálculo de densidades.

Factor	Descripción	Valor
A	Masa en aire de la muestra seca al horno (g)	491
B	Masa del picnómetro lleno con agua (g)	4945
C	Masa del picnómetro lleno con muestra y agua (g)	5246

---

S	Masa de la muestra en estado SSS (g)	500
---	--------------------------------------	-----

---

Densidad relativa seca:

$$\text{Densidad relativa seca} = \frac{A}{(B + S - C)} = 2.47 \quad (8)$$

Densidad relativa SSS:

$$\text{Densidad relativa SSS} = \frac{S}{(B + S - C)} = 2.51 \quad (9)$$

Densidad relativa aparente:

$$\text{Densidad relativa aparente} = \frac{A}{(B + A - C)} = 2.58 \quad (10)$$

Densidad seca:

$$\text{Densidad seca} = \frac{997.5 A}{(B + S - C)} = 2461.17 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (11)$$

Densidad SSS:

$$\text{Densidad SSS} = \frac{997.5 B}{(B + S - C)} = 2506.28 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (12)$$

Densidad aparente:

$$\text{Densidad aparente} = \frac{997.5 A}{(B + A - C)} = 2577.75 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (13)$$

Absorción:

$$\% \text{ Absorción} = \frac{(S - A)}{A} \times 100 = 1.83 \quad (14)$$

### Densidades y absorción del agregado grueso:

Estas propiedades del árido grueso fueron determinadas siguiendo las indicaciones de la norma (ASTM C 127, 2004). Tal como indica la norma, se debe sumergir en agua por  $24 \pm 4$  horas una muestra de agregado grueso, previamente secado, con el fin de llenar los poros con agua. Al retirar el agua de la muestra se seca el agua superficial de las partículas y se determina su masa. Posteriormente, el volumen es determinado por el método de desplazamiento de agua. Finalmente, la muestra se seca y se obtiene su masa. Para definir estos parámetros es necesario conocer los siguientes datos:



Tabla 3. Factores para cálculo de densidades.

Factor	Descripción	Valor
A	Masa en aire de la muestra seca al horno (g)	1954
B	Masa en aire de la saturada superficialmente seca (g)	2000
C	Masa aparente en agua de la muestra saturada (g)	1233.3

Densidad relativa seca:

$$\text{Densidad relativa seca} = \frac{A}{(B - C)} = 2.55 \quad (15)$$

Densidad relativa SSS:

$$\text{Densidad relativa SSS} = \frac{B}{(B - C)} = 2.61 \quad (16)$$

Densidad relativa aparente:

$$\text{Densidad relativa aparente} = \frac{A}{(A - C)} = 2.711 \quad (17)$$

Densidad seca:

$$\text{Densidad seca} = \frac{997.5 A}{(B - C)} = 2542.21 \frac{kg}{m^3} \quad (18)$$

Densidad SSS:

$$\text{Densidad SSS} = \frac{997.5 B}{(B - C)} = 2602.06 \frac{kg}{m^3} \quad (19)$$

Densidad aparente:

$$\text{Densidad aparente} = \frac{997.5 A}{(A - C)} = 2704.47 \frac{kg}{m^3} \quad (20)$$

Absorción:

$$\% \text{ Absorción} = \frac{(B - A)}{A} \times 100 = 2.35 \quad (21)$$

### 1.1.2. Humedad:

Los procedimientos para determinar la humedad de los agregados gruesos para concretos se encuentran dentro de la norma ASTM C 566. Tanto los agregados

finos como los agregados gruesos se trabajaron en estado completamente seco, por lo que el contenido de humedad fue nulo.

### 1.1.3. Granulometría:

La granulometría de los agregados, tanto fino como grueso, tiene un papel fundamental en el diseño de mezcla de un concretos autocompactantes. Una granulometría adecuada de agregados mejora la calidad del concreto resultante, precisando menor cantidad de materia cementante, menor agua de mezclado, disminuye la tendencia a segregarse y genera menor contracción por secado que un concreto constituido por agregado mal graduado o con granulometría escalonada. Este método consiste en separar las partículas de una muestra de agregado seco por tamaño a través de una serie de tamices de apertura estándar (1/2", 3/8", N:4, N:8, N:16, N:30, N:50, N:100, N:200 y fondo metálico) ordenadas descendientemente, que cubran los tamaños de partículas del material a ensayarse. La masa de las partículas expresadas en porcentajes retenidas en cada tamiz expresa la distribución de tamaño de las partículas.

El procedimiento del método de ensayo para determinar la distribución granulométrica de los áridos, fino y grueso, con el fin de utilizarlos en la elaboración de concreto, se realizó siguiendo la norma (ASTM C 136, 2014). Los requisitos necesarios que los agregados para concreto deben cumplir, tanto finos como gruesos, se encuentran en la norma (ASTM C 33, 2016).

Para la realización de ambas granulometrías, se tomaron muestras por el método de muestreo, indicado en la norma (ASTM D 75, 2003). Estas muestras se mezclaron y secaron completamente. Las muestras tomadas de cada agregado fueron 500 gramos para el agregado fino y 5000 gramos para el agregado grueso, las cuales cumplen con los tamaños mínimos de muestras recomendados por la norma antes mencionada. Se colocó la muestra correspondiente en la serie de tamices ordenada por tamaños descendentes, seguido de un tiempo necesario de cribado. Finalmente se pesa el material retenido por cada tamiz en balanza electrónica, graficando la cantidad de material respecto al tamaño de grano.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la granulometría del agregado fino y agregado grueso.

### Granulometría Arena triturada:

Tabla 4. Granulometría Arena Triturada

Tamiz	Peso Retenido (g)	Peso Retenido(g) Real	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa
4	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00

2 1/2	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1 1/2	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1/4	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
Nº 4	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
Nº 8	89.35	0.00	11.20	11.20	88.80
Nº 16	162.25	0.00	20.34	31.54	68.46
Nº 30	202.42	0.00	25.37	56.91	43.09
Nº 50	217.60	0.00	27.27	84.18	15.82
Nº 100	112.20	0.00	14.06	98.24	1.76
Nº 200	10.95	0.00	1.37	99.62	0.38
P Nº 200	3.06	0.00	0.38	100.00	0.00

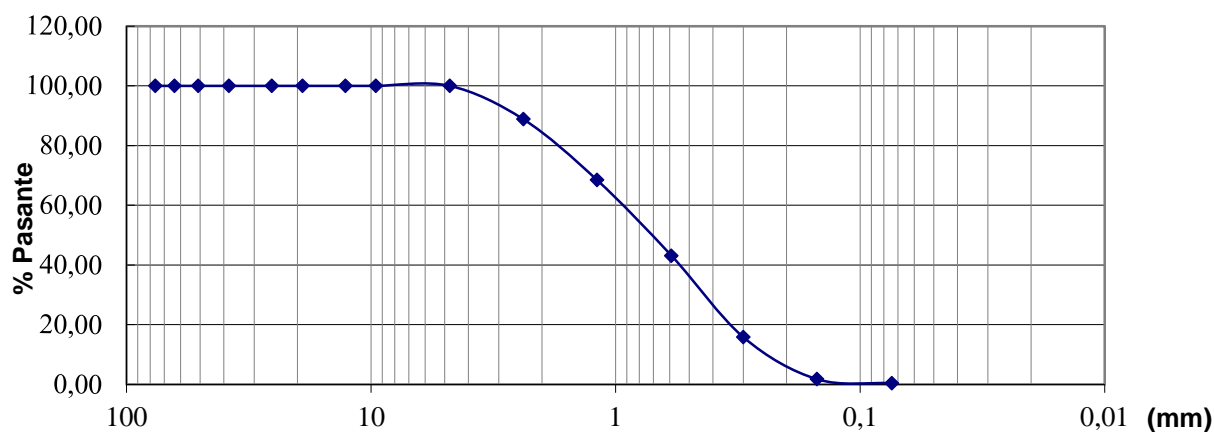


Ilustración 2. Curva granulométrica árido fino triturado.

Módulo de Finura = 2.82

### Granulometría Agregado Fino Combinado:

Tabla 5. Granulometría Agregado Fino Combinado.

Tamiz	Peso Retenido (g)	Peso Retenido (g) Real	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa
4	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
2 1/2	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1 1/2	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00

1	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1/4	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
Nº 4	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
Nº 8	25.99	26.22	5.24	5.24	94.76
Nº 16	55.88	56.39	11.28	16.52	83.48
Nº 30	81.23	81.96	16.39	32.91	67.09
Nº 50	92.72	93.56	18.71	51.63	48.37
Nº 100	208.57	210.46	42.09	93.72	6.28
Nº 200	25.36	25.59	5.12	98.84	1.16
P Nº 200	5.77	5.82	1.16	100.00	0.00

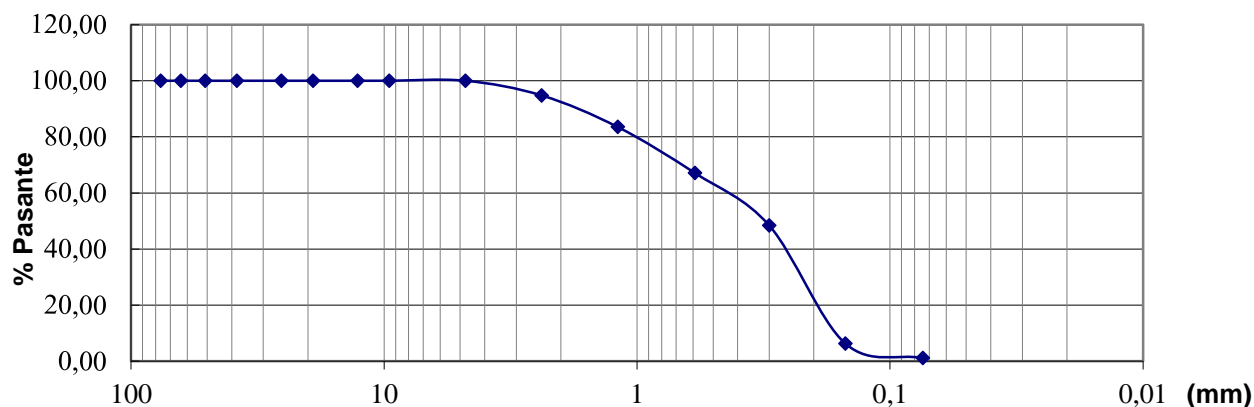


Ilustración 3. Curva granulométrica árido fino combinado.

Módulo de Finura = 2.00

### Granulometría Agregado grueso:

Tabla 6. Granulometría Agregado Grueso.

Tamiz	Peso Retenido (g)	Peso Retenido (g) Real	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa
4	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
2 1/2	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1 1/2	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00

<b>3/8</b>	6.00	6.00	0.12	0.12	99.88
<b>Nº 4</b>	4456.00	4467.63	89.35	89.47	10.53
<b>Nº 8</b>	418.00	419.09	8.38	97.85	2.15
<b>Nº 16</b>	107.00	107.28	2.15	100.00	0.00
<b>Nº 30</b>	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00
<b>Nº 50</b>	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00
<b>Nº 100</b>	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00
<b>Nº 200</b>	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00
<b>P Nº 200</b>	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00

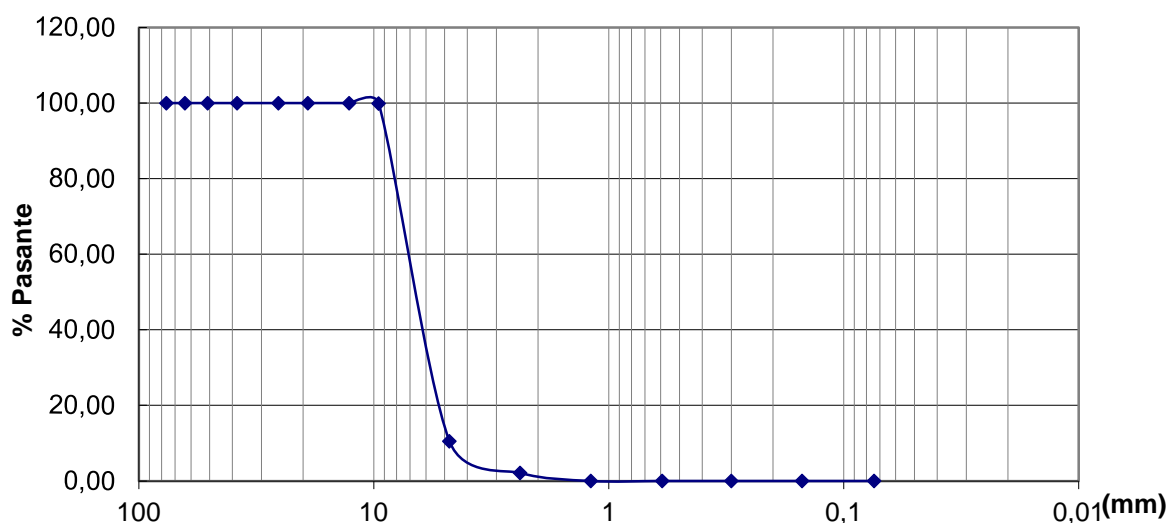


Ilustración 4. Curva granulométrica árido grueso.

Módulo de Finura = 5.87

Cerca del 100% de las partículas provenientes del agregado grueso tienen un mismo tamaño, siendo este el tamaño nominal iguala 3/8" (9.5 mm), lo que quiere decir, que el tamaño de las partículas es uniforme y la pasta cementante que rodea y une las partículas ocupa mayor volumen a comparación de un concreto compuesto por áridos de tamaños variados (Mora Abril, 2014).

Según la tabla 3 de la norma INEN 872:2011, apartado 6.2.1, la granulometría del agregado grueso empleado se considera como árido grueso dentro del rango 9.5-2.36 mm.

#### 1.1.4. Tamaño máximo nominal (TMN) del agregado:

El tamaño máximo nominal del agregado interviene en los requisitos de pasta, influye en la granulometría óptima y reduce o aumenta la segregación, asentamiento y exudación (M. F. (Univeridad T. N. Carrasco, 1997). Asimismo, este tamaño tiene que ser concordante con las características de la estructura a

ejecutar. Tanto las especificaciones físicas como químicas de los áridos para concretos autocompactantes, son iguales a las de los concretos normales, restringiendo únicamente el tamaño máximo del árido, con el fin de beneficiar el paso del concreto a través del refuerzo de la pieza a hormigonar.

Según la ASTM, el tamaño máximo del agregado está definido por la apertura del menor tamiz a través del cual pasa en forma acumulada un valor igual al 100% del peso total de la muestra.

En la distribución granulométrica del agregado grueso se puede observar que en el tamiz 3/8" se encuentran 6 gramos retenidos, lo que representa un porcentaje insignificante con respecto al peso de la muestra total (5000 g), por lo que se considera como tamaño máximo del agregado 3/8" (9.5 mm). En la confección del concreto autocompactante, con el fin de beneficiar el paso del concreto a través del refuerzo de la pieza a hormigonar, el tamaño máximo de agregado grueso recomendado es de 20 mm ( $\frac{3}{4}$ " ), según múltiples fuentes (Burón, Jaime, & Garrido, 2006).

#### **1.1.5. Forma:**

La forma de los agregados tiene gran influencia en el concreto, tanto en estado fresco como endurecido, como es en la trabajabilidad y la resistencia respectivamente. Es esencial utilizar agregados que contengan una muy baja cantidad de partículas chatas y alargadas (lajas) y partículas finas y alargadas (elongadas), ya que estas reducen la trabajabilidad del concreto y según su posición en la mezcla, pueden llegar a disminuir notablemente la resistencia a flexión del concreto, una vez en estado endurecido. (M. F. (Univeridad T. N. Carrasco, 1997).

Ya que el agregado grueso empleado es roca triturado, su forma es angular. Producto de su trituración, el agregado posee orillas bien definidas que se forman en la intersección de caras más o menos planas. (M. F. (Univeridad T. N. Carrasco, 1997).



*Ilustración 5. Agregado grueso.*

#### **1.1.6. Textura superficial:**

Esta propiedad de los agregados se fundamenta en si la superficie de una partícula es pulida o lisa; suave o áspera. +

#### **1.2. Cemento:**

El cementante empleado en la mezcla, para la fabricación de los CAC, fue cemento Portland hidráulico Fuerte tipo GU de la empresa Holcim, el cual corresponde a cemento de fraguado normal y uso para construcciones en general, equivalente a cemento Portland Tipo I. El cemento fabricado por la empresa Holcim Ecuador S.A. cumple con la normativa (ASTM C 1157, 2011).



*Ilustración 6. Cemento utilizado.*

### 1.3. Aditivo:

Para la elaboración de este tipo de concreto es necesario el uso de aditivos superplastificantes de última generación, otorga trabajabilidad y fluidez, así como disminuyen los efectos negativos originados por la falta de uniformidad en la dosificación generado por la granulometría de los áridos (Burón et al., 2006).

El aditivo superplastificante utilizado en la mezcla es comercializado por la casa Sika bajo el nombre de Viscocrete 2100. El aditivo es un reductor de agua de alto rango e hiperplastificante, fabricado con polímeros policarboxilatos. Como recomendación del fabricante se tiene que su dosificación va desde 0.19% hasta 0.9% del peso del cemento.



*Ilustración 7. Aditivo viscocrete 2100.*

### 1.4. Agua:

El agua es uno de los principales elementos para la confección de concreto, ya que esta es esencial para generar las reacciones químicas en el cementante en el proceso de hidratación, así como actuar de agente dispersante del cemento. El agua utilizada para la fabricación de los CAC es el agua suministrada por la empresa ETAPA EP, la misma que es potable y de uso doméstico, libre de ácidos, sustancias alcalinas y materia orgánica, las cuales son perjudiciales para el concreto a corto y largo plazo. El agua empleada cumple los requerimientos de la normativa (ASTM C 1602, 2012).

### 1.5. Fibras

El concreto en estado es un material frágil, con baja resistencia a tracción, por lo que, en los últimos 40 años se ha presenciado un incremento en el uso de fibras como refuerzo para cemento y concreto. Se ha determinado que la adición de fibras no produce un incremento significativo en la resistencia a compresión del concreto, sin embargo, su principal papel es controlar la fisuración o “cracking”. En la última década el mundo de la construcción ha visto un gran progreso en la optimización de materiales compuestos; nuevos tipos de fibras y geometrías se



han desarrollado, así como nuevos tratamientos a la superficie de las fibras con el fin de tener una mejor reacción entre las fibras y los materiales cementosos. (Bentur, University of British Columbia, Mindess, & University of British Columbia, 2007).

“Las fibras fueron usadas como material de construcción por muchos siglos. En las últimas tres décadas hubo un crecimiento por el interés en el uso de fibras en concreto premezclado, concreto prefabricado y concreto lanzado. Las fibras de acero, plástico, vidrio y materiales naturales están disponibles en una amplia variedad de formas, tamaños y espesor; pueden ser cilíndricas, llanas, onduladas y deformadas con longitud típica de 60 mm a 150 mm y espesor variado de 0.005 mm a 0.75 mm. Las fibras se añaden al concreto durante el mezclado.” (Kosmatka & Kerkoff, 2004).

“Las fibras se adicionan al concreto normalmente en bajos volúmenes (frecuentemente menos del 1%) y han mostrado eficiencia en el control de la fisuración por contracción (retracción).” (Kosmatka & Kerkoff, 2004).

El uso de fibras sintéticas, como las de polipropileno, en materiales cementosos se ha incrementado en los últimos años. Las propiedades de las fibras sintéticas varían ampliamente con respecto a su resistencia y módulo de elasticidad. Para que la adición de estas fibras incremente la resistencia del material compuesto, es necesario que el módulo de elasticidad de las fibras sea mayor al matriz cementante, condición difícil de superar ya que el módulo de elasticidad de la matriz en el concreto se encuentra dentro del rango de 15 a 40 GPa.

Las fibras sintéticas son las fibras que se fabrican por el hombre y el desarrollo de las industrias petroquímicas y textiles. Los tipos de fibras usadas en concreto son: acrílicas, aramida, carbón, nylon, poliéster, polietileno y polipropileno. Las fibras pueden presentar problemas de baja adherencia fibra-matriz, pruebas de desempeño no concluyentes para volúmenes bajos de fibras, además de tener altos costos. (Kosmatka & Kerkoff, 2004). Para el caso de estudio planteado se ha provisto el uso de macrofibras de polipropileno comercializadas por Sika bajo el nombre de Sika Fiber Force PP/PE-700/55 y macrofibras recicladas obtenidas del proceso de botellas de PET.

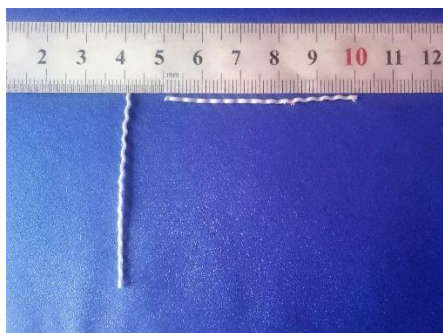
### **1.5.1. Fibras plásticas Sika Fiber Force PP/PE-700/55:**

Sika Fiber Force PP/PE-700/55 es una fibra macro sintética de alta densidad diseñada y usada para el refuerzo secundario de concreto, es fabricada a partir de polipropileno virgen y polímeros de alto desempeño, luego la misma es deformada mecánicamente hasta su forma final, con el fin de maximizar el anclaje en el concreto.



*Ilustración 8. Fibras Sika Fiber Force PP/PE-700/55.*

Estas fibras son comúnmente usadas en concreto proyectado en túneles y galerías, para la fabricación de prefabricados y concretos livianos, así como la construcción de losas sobre terreno, reforzamiento de pisos y en pavimentos rígidos, siendo estos sus principales usos. (Sika, 2015).



*Ilustración 9. Dimensiones de las fibras plásticas Sika Fiber Force PP/PE-700/55..*

Entre sus principales ventajas se encuentran el incremento de tenacidad del concreto, la resistencia al impacto, la mantención de manejabilidad del concreto, incremento de ductilidad, mejora la durabilidad del concreto, la disminución de la tendencia al agrietamiento en estado fresco como endurecido, entre otros. (Sika, 2015).

Datos técnicos:

*Tabla 7. Propiedades Fibras Sika Fiber Force PP/PE-700/55.*

Propiedad	Valor
Largo	55 mm
Color	Gris oscuro
Resistencia a tracción	360 MPa
Punto de ablandamiento	160 °C
Conductividad térmica	Baja
Resistencia a álcalis	Alta
Resistencia a sales y ácidos	Alta

---

Tipo de Fibra	Monofilamento
Gravedad específica	1.3 kg/l
Absorción	0%
Punto de Ignición	260°C
Conductividad eléctrica	Baja
Módulo elástico	4800 MPa

---

### 1.5.2. Fibras plásticas recicladas PET.



*Ilustración 10. Fibras recicladas.*

PET, o tereftalato de polietileno, es una resina plástica y el tipo más común de poliéster. El PET es un material de empaque transparente, ligero, fuerte, seguro y reciclable, haciéndolo adecuado para una amplia gama de aplicaciones. Este material es fácil de almacenar, transportar, limpiar y resellar, por lo que se ha convertido en el material más utilizado en la fabricación de botellas, vasos y contenedores desechables. El PET ofrece una barrera inherente, que protegen y conservan el contenido del empaque. (NAPCOR, 2010).

PET es el plástico más reciclado en el mundo; 1.4 billones de libras de PET fueron recicladas en 2009. (NAPCOR, 2010). Estudios realizados en 2010 muestran que por cada libra de hojuelas de PET reciclado utilizada, el uso de energía se reduce en un 84% y las emisiones de gases de efecto invernadero en un 71%. (Associates, 2010).

Las fibras plásticas recicladas que fueron incorporadas, para la fabricación de los CAC provienen del laminado de botellas de PET. Como inicio del proceso de reciclaje se realizó una limpieza de las botellas, lavándolas interior y exteriormente con agua apta para el consumo humano, posteriormente de haber removido la etiqueta. Luego estas son cortadas manualmente mediante fileteadoras, las cuales fueron fabricadas artesanalmente. Esta máquina cortadora, o fileteadora, consta de un taco de madera, al cual se le realizó un corte vertical, por donde pasa la botella, y un corte horizontal hasta la mitad del espesor del taco de madera, en donde se sujeta una cuchilla o bisturí. De esta manera se obtiene una lámina de la botella reciclada, cuya longitud varía y su ancho se encuentra dentro del rango de  $5 \pm 2$  mm. Luego de haber realizado el

laminado de la botella, se procede al cortado de la lámina en fibras de  $55 \pm 5$  mm de longitud, para asemejar sus propiedades geométricas a las fibras Sika Fiber Force PP/PE-700/55.



*Ilustración 11. Fibras recicladas (dimensiones).*

A continuación, se presentan las propiedades mecánicas y químicas del material PET:

*Tabla 8. Propiedades Fibras Recicladas.*

PROPIEDADES MECANICAS A 23°C	UNIDAD	ASTM	DIN	VALORES
PESO ESPECIFICO	gr/cm <sup>3</sup>	D-792	53479	1.39
RESIST. A LA TRACC.(FLUENCIA / RUPTURA)	Kg/cm <sup>2</sup>	D-638	53455	900 / --
RES. A LA COMPRESION ( 1 Y 2 % DEF)	Kg/cm <sup>2</sup>	D-695	53454	260 / 480
RESISTENCIA A LA FLEXION	Kg/cm <sup>2</sup>	D-790	53452	1450
RES. AL CHOQUE SIN ENTALLA	Kg.cm/cm <sup>2</sup>	D-256	53453	> 50
ALARGAMIENTO A LA RUPTURA	%	D-638	53455	15
MÓDULO DE ELASTICIDAD (TRACCION)	Kg/cm <sup>2</sup>	D-638	53457	37000
DUREZA	Shore D	D-2240	53505	85 - 87
COEF. DE ROCE ESTATICO S/ACERO		D-1894		--
COEF. DE ROCE DINAMICO S/ACERO		D-1894		0.2
RES. AL DESGASTE POR ROCE				MUY BUENA

*Tabla 9. Propiedades Químicas Fibras Recicladas.*

PROPIEDADES QUIMICAS	OBSERVACIONES
RESISTENCIA A HIDROCARBUROS	BUENA



RESISTENCIA A ACIDOS DEBILES A TEMP. AMBIENTE	BUENA
RESISTENCIA A ALCALIS DEBILES A TEMP. AMBIENTE	BUENA
RESISTENCIA A PROD. QUIMICOS DEFINIDOS	CONSULTAR
EFFECTO DE LOS RAYOS SOLARES	ALGO LO AFECTAN
APROBADO PARA CONTACTO CON ALIMENTOS	SI
COMPORTAMIENTO A LA COMBUSTION	ARDE CON MEDIANA DIFICULTAD
PROPAGACION DE LLAMA	MANTIENE LA LLAMA
COMPORTAMIENTO AL QUEMARLO	GOTEA
COLOR DE LA LLAMA	AMARILLO ANARANJADO
OLOR AL QUEMARLO	TIZNADO
	AROMATICO DULCE

---

---

## CAPÍTULO II: DISEÑO DE EXPERIMENTOS

En el año 2015 tuvimos la oportunidad de participar en el Tercer Concurso Nacional de Hormigones organizado por el INECYC, de igual manera en el concurso internacional FRP Composites Competition por parte del ACI. La dosificación empleada en estos concursos se logró como resultado de un método experimental básico, como es el de Prueba y Error. Este tipo de experimentos, al ser básico e incompleto, demanda gran cantidad de recursos materiales, económicos y requiere gran cantidad de tiempo hasta lograr los resultados esperados. Debido a los inconvenientes antes mencionados, surgió la necesidad de una alternativa en función de encontrar un concreto que presente mejoras en las características deseadas, siendo la mejor alternativa la realización de un diseño experimental.

Se ha escogido el diseño de experimentos como herramienta para poder realizar la investigación de manera más eficiente, es decir, realizando únicamente las pruebas necesarias e invirtiendo los recursos necesarios con el fin de lograr la mezcla de mejores características.

### 2.1. Definición de un ensayo experimental

El diseño de experimentos es la aplicación del método científico para generar conocimiento acerca de un sistema o proceso, por medio de pruebas planeadas de una forma adecuada. El diseño estadístico de experimentos es la manera más eficaz de hacer pruebas, y consiste en determinar las pruebas a realizar y la manera, para obtener datos que, al ser analizados estadísticamente, generen evidencias objetivas que permitan responder las interrogantes planteadas, y de esa manera clarificar las incertidumbres en procesos o lograr mejoras en el mismo (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2008).

Para entender de manera clara el diseño de experimentos a continuación se presenta una serie de definiciones básicas para su realización.

- Experimento: “Es un cambio en las condiciones de operación de un sistema o proceso, que se hace con el objetivo de medir el efecto del cambio sobre una o varias propiedades del producto o resultado. Así mismo, el experimento permite aumentar el conocimiento acerca del sistema.” (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2008).
- Unidad experimental: “Es la pieza o muestra que se utiliza para generar un valor que sea representativo del resultado del experimento o prueba. En cada diseño de experimentos es importante definir de manera cuidadosa la unidad experimental, ya que ésta puede ser una pieza o muestra de una sustancia o un conjunto de piezas producidas, dependiendo del proceso que se estudia.” (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2008).
- Variable de respuesta: “A través de esta variable se conoce el efecto o los resultados de cada prueba experimental, por lo que pueden ser



características de la calidad de un producto.” (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2008).

- Factores controlables: “Son variables de proceso o características de los materiales experimentales que se pueden fijar en un nivel dado. Algunos de éstos son los que usualmente se controlan durante la operación normal del proceso, y se distinguen porque, para cada uno de ellos, existe la manera o el mecanismo para cambiar o manipular su nivel de operación. Esto último hace posible la experimentación con ellos.” (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2008).
- Factores no controlables o de ruido: “Son variables o características de materiales y métodos que no se pueden controlar durante el experimento o la operación normal del proceso.” (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2008).
- Factores estudiados: “Son las variables que se investigan en el experimento, respecto de cómo influyen o afectan a la variable de respuesta. Los factores estudiados pueden ser controlables o no controlables, a estos últimos quizá fue posible y de interés controlarlos durante el experimento. Para que un factor pueda ser estudiado, es necesario que durante el experimento se haya probado en, al menos, dos niveles o condiciones.” (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2008).
- Niveles y tratamientos: “Los diferentes valores que se asignan a cada factor estudiado en un diseño experimental se llaman niveles. Una combinación de niveles de todos los factores estudiados se llama tratamiento o punto de diseño.” (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2008).

El diseño de experimentos trata acerca de fenómenos observables y repetibles. Por lo que, sin el pensamiento estadístico, los conceptos de repetibilidad y observabilidad son inherentemente contradictorios. Todo lo observado se aprecia con variabilidad, nada ocurre exactamente de igual forma dos veces. Se debe ser muy cuidadoso al momento de la planeación y el análisis del experimento. Lo primordial de una buena planeación y análisis de un experimento es la aplicación correcta de los principios básicos del diseño de experimentos, es decir una correcta: aleatorización, repetición y bloqueo. Estos tienen que ver directamente con que los datos obtenidos sean útiles para responder a las interrogantes planteadas, es decir la validez de los datos están apoyados en estos principios.

- Aleatorización: “Consiste en hacer corridas del experimento en un orden completamente aleatorio, además de usar material seleccionado aleatoriamente. de esta forma aumenta la probabilidad de que el supuesto de independencia de los errores se llegue a cumplir, siendo esto un requisito para la validez de las pruebas estadísticas que se realizan.” (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2008).

- Repetición: “Hace referencia a correr más de una vez un tratamiento o una combinación de factores. Repetir se basa en volver a realizar el tratamiento, pero no inmediatamente después, sino cuando corresponda de acuerdo a la aleatorización propuesta. Esto permite distinguir de mejor manera que parte de la variabilidad total de los datos se debe al error aleatorio y a cuál de los factores.” (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2008).
- Bloqueo: “Consiste en nulificar o tomar en cuenta, de manera adecuada, todos los factores que puedan afectar la respuesta observada. Al bloquear, el subconjunto de datos que se obtenga dentro de cada bloque, debe resultar más homogéneo que el conjunto total de datos.” (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2008).

## **2.2. Delimitación del caso de estudio**

En la actualidad, se encuentra con facilidad bibliografía concreta sobre concretos autocompactantes (CAC), contrario a bibliografía de concretos con inclusión de fibras, la cual es significativamente menor. La mayor cantidad de bibliografía encontrada sobre concretos con inclusión de macrofibras proviene de distintas casas comerciales. Al tratarse de CAC con inclusión de fibras recicladas, existe muy poca información en la cual pueda basarse cualquier futura investigación.

Se propone, para el caso de estudio, analizar y comparar las propiedades mecánicas de forma separada y en conjunto, de la inclusión de macrofibras de una casa comercial y macrofibras recicladas, descritas en el Capítulo I, en un CAC base, enfocados en encontrar la combinación que mejores propiedades mecánicas presente.

Mediante análisis de varianza ANOVA simple y multifactorial se estudió la variación producida por los diferentes factores y sus niveles, en todas las mezclas analizadas, tomando como variables de respuesta las propiedades mecánicas del concreto listadas en el siguiente subcapítulo.

## **2.3. Elección de variables**

La elección de las variables a considerar es de suma importancia, ya que en las mismas se verán reflejados los resultados de las pruebas propuestas. Estas variables deben caracterizar de mejor manera al caso de estudio. Además, las mismas deben ser resultados de pruebas con alta confiabilidad.

En el caso de estudio se propone analizar las siguientes propiedades mecánicas fundamentales en concretos, siendo estas:

- Resistencia a compresión simple.
- Módulo de elasticidad.
- Módulo de ruptura.
- Relación de Poisson



- Asentamiento.
- Velocidad de onda.

Las variables antes mencionadas se determinan siguiendo los procesos propuestos por la normativa ASTM, explicadas posteriormente en el Capítulo IV. Las herramientas de medición proporcionan precisión alta, por lo que la confiabilidad no se ve comprometida. Además, las variables proporcionan información fundamental sobre la variación de las propiedades en cada tipo de concreto.

## **2.4. Factores**

### **2.4.1. Factores y niveles**

En el ensayo experimental planteado es necesario que se realicen diferentes pruebas para comprobar la variación que sufren los concretos fabricados con diferentes cantidades de fibra incluidas en cada mezcla. Se propone como factores a los 2 tipos de fibras a incluirse en las mezclas para la fabricación de los CAC, es decir, el factor 1 son las fibras Sika Fiber Force PP/PE-700/55 y el factor 2 son las fibras recicladas de PET.

Los niveles que se proponen para el análisis son 3:

1. 0.00 kg de fibra por metro cúbico de concreto.
2. 2.25 kg de fibra por metro cúbico de concreto.
3. 4.50 kg de fibra por metro cúbico de concreto.

Resultando 9 kg por metro cúbico de fibras en la combinación con máximo contenido de fibras, cumpliendo con las recomendaciones del fabricante de 2 a 9 kg de fibra por metro cúbico de concreto (Sika, 2010). Se presenta una mezcla de CAC base, sin la inclusión de ningún tipo de fibra, con el fin de obtener las propiedades mecánicas de este, para resaltar los cambios que las fibras provocan en las propiedades del concreto, y así poder comparar y evaluar las características y propiedades de los CAC reforzados por fibras respecto a las del CAC base.

### **2.4.2. Factores controlables y de bloqueo**

Para comparar los efectos de los factores de manera efectiva, se requiere que las posibles diferencias se deban principalmente al factor de interés y no a factores que no se consideran. Un efecto producido por factores no analizados puede afectar de manera sensible a los resultados. El bloqueo consiste en la eliminación del efecto que producen ciertos factores no considerados en el diseño. En la confección de concretos muchos factores influyen en el resultado final, siendo estos adicionales a los factores de interés, llamados factores de bloques. Estos efectos tienen nivel de importancia secundaria en el estudio, y son los siguientes:

- Elaboración y curado de las probetas: Para la elaboración y curado de los especímenes se ha seguido el mismo procedimiento en todos los lotes de concreto o fundidas, indicados en la norma (ASTM C 31, 2010).
- Procedimiento de mezclado del concreto: Se realizó un procedimiento de operación estándar (SOP), siguiendo un método estandarizado de mezclado para el concreto, explicado posteriormente **en el Capítulo III**, buscando de esta manera proporcionar mejores características de replicabilidad a la confección de las mezclas. Además, por medio de este proceso estandarizado de mezclado, se busca evitar cualquier tipo de variación producida por este factor controlable.
- Equipos de mezclado: Los mismos equipos de mezclado, llenado y de ensayos, tanto en estado fresco como endurecido, se mantuvieron durante todo el experimento. Estos se encuentran debidamente calibrados y certificados.
- Agregados grueso y fino: Toda la cantidad de agregados utilizados para la confección de las probetas de concreto, provienen de la misma cantera y fueron obtenidos el mismo día del mismo lote de material, evitando variaciones debido a la fuente, tipo y lote.
- Cemento: El cemento utilizado fue siempre de la misma marca y fue empleado dentro de su vida útil.
- Edad de ensayo de especímenes: Las probetas confeccionadas fueron ensayadas bajo las mismas condiciones de edad, siendo esta de 28 días, es decir todas se encontraban en un mismo periodo de curado luego de haber sido confeccionadas.
- Personal de laboratorio: El personal que confeccionó las probetas del experimento ha sido siempre el mismo equipo de personas, las cuales tienen experiencia en el tema de confección de concreto.
- Condiciones de humedad de agregados: La humedad de todos los tipos de áridos se bloquea de forma que este no influya en las variables de análisis. Esto logró trabajando con los agregados completamente secos.

#### **2.4.3. Factores no controlables**

De igual manera, existen factores que no se pueden controlar por ningún método convencional. Estos factores, a pesar de que tienen cierta influencia en los resultados, no son considerados como factores importantes. En la elaboración de los CAC, los factores no controlables son los siguientes:

- Temperatura: La temperatura en la ciudad de Cuenca no es constante durante el día, y a pesar de que la confección de los CAC se realizó aproximadamente en el mismo horario todos los días, las temperaturas es

variable día a día. La influencia de este factor sobre las variables respuesta a analizar no es significativa.

- Humedad relativa del ambiente: La humedad relativa del ambiente fluctúa diariamente en la ciudad de Cuenca, por lo que es otro factor del cual no se tiene control. Este factor genera poca variabilidad sobre las variables de respuesta analizadas.
- Viento: Este factor se encuentra en función del clima, por lo que se convierte en un factor no controlable, pero de baja influencia sobre las variables de respuesta de interés.

## 2.5. Diseño Factorial

El objetivo de un diseño factorial es el estudio del efecto de varios factores sobre una o varias respuestas, cuando se tiene el mismo interés sobre todos los factores. Los factores pueden ser de tipo cualitativo o de tipo cuantitativo, para el caso de estudio los factores serán de tipo cualitativo. Para estudiar la influencia de cada factor sobre la variable de respuesta, es necesario que existan al menos dos niveles por factor. En el presente experimento, se presentan 3 niveles en los 2 factores, como se mencionó anteriormente.

### 2.5.1. Diseño factorial $3^k$

El diseño factorial  $3^k$  considera  $k$  factores con tres niveles cada uno y tiene  $3^k$  tratamientos. Sin embargo, este tipo de diseños factoriales es de fácil aplicación siempre que se mantenga con un número de factores menor o igual a 3. Existen situaciones prácticas en las que el diseño  $3^k$  es una buena alternativa. Para el caso de estudio se tienen 2 factores con 3 niveles de análisis de cada uno, siendo este un diseño factorial  $3^2$ .

El diseño factorial  $3^2$  consiste en  $3^2=9$  tratamientos diferentes, correspondientes a todas las posibles combinaciones de los 2 factores en sus 3 niveles. A continuación, se presenta en la tabla 10 todas las combinaciones de mezclas resultantes del diseño factorial  $3^k$ , con sus respectivos factores y niveles:

Tabla 10. Cantidad de Fibras por tratamiento.

Tratamiento	Tipo de Mezcla
1	Mezcla Base
2	50% Fibra Normalizada (2.25 kg/m <sup>3</sup> )
3	50% Fibra Reciclada (2.25 kg/m <sup>3</sup> )
4	100% Fibra Normalizada (4.50 kg/m <sup>3</sup> )
5	100% Fibra Reciclada (4.50 kg/m <sup>3</sup> )
6	50% Fibra Normalizada (2.25 kg/m <sup>3</sup> ) - 50% Reciclada (2.25 kg/m <sup>3</sup> )
7	100% Fibra Normalizada (4.50 kg/m <sup>3</sup> ) - 50% Reciclada (2.25 kg/m <sup>3</sup> )

8	50% Fibra Normalizada (2.25 kg/m <sup>3</sup> ) - 100% Reciclada (4.50 kg/m <sup>3</sup> )
9	100% Fibra Normalizada (4.50 kg/m <sup>3</sup> ) - 100% Reciclada (4.50 kg/m <sup>3</sup> )

En la Ilustración 12 se expresa gráficamente el diseño factorial 3<sup>k</sup>, con sus respectivos niveles y factores, en función de las variables respuesta.

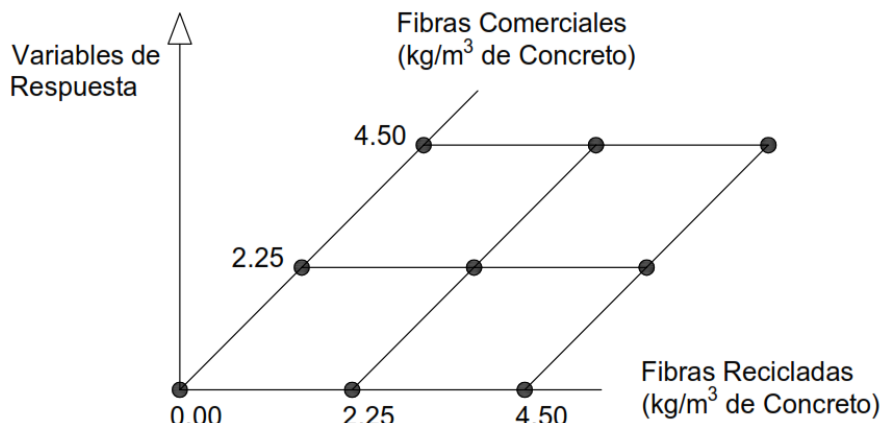


Ilustración 12. Experimento 3k, espacio muestral.

El número de repeticiones por punto se ha calculado en base a probetas fabricadas anteriormente, es decir estas probetas se fabricaron para poder obtener estadísticos que indiquen si existe o no variación significativa al momento de confeccionarlas. Se realizó una población de muestras de un total de 79 cilindros de concreto autocompactante sin la adición de ningún tipo de fibra. Posteriormente se realizó el cálculo de medias y desviaciones para poder determinar, con un nivel de confianza del 95 %, cuantas repeticiones de cada punto confeccionar.

En la tabla 11 se presentan los resultados del ensayo de compresión simple de las probetas antes mencionadas:

Tabla 11. Estadísticos para tamaño de muestra.

Resistencia a compresión		
Media	480.90	kg/cm <sup>2</sup>
Desviación estándar	26.04	kg/cm <sup>2</sup>
Varianza	678.17	(Kg/cm <sup>2</sup> ) <sup>2</sup>
Error estándar de la media	5.316	kg/cm <sup>2</sup>

Se ha usado el promedio de la resistencia a compresión de cada dos probetas cilíndricas de concreto para el análisis de datos. El error máximo asumido es de 36 kg/cm<sup>2</sup>, con un nivel de confianza del 95% (ACI, 2014).

$$n = \left( \frac{Z_{\frac{\alpha}{2}} * \sigma}{e} \right)^2 \quad (22)$$

Donde:

$$Z_{\frac{\alpha}{2}} = \text{Valor } Z \text{ para nivel de confianza del 95\%}$$

$$\sigma = \text{Desviación estándar}$$

$e$  = Error maximo tolerable

$n$  = numero de repeticiones

En base a los resultados obtenidos anteriormente se obtuvo un total de 2 réplicas por punto. Se realizó 3 réplicas de cada tratamiento esperando tener cierto grado adicional de confianza en los resultados. Para cada uno de los 9 tratamientos se realizaron 3 réplicas, que suman 27 lotes de mezcla, en los que se incluyen 2 probetas cilíndricas y una probeta prismática de CAC, teniendo así un total de 54 probetas cilíndricas y 27 prismáticas.

Para dar paso a la confección de los diferentes tratamientos, con sus respectivas réplicas, se aleatorizó el orden de confección de cada uno, proporcionando de esta manera aleatoriedad y confiabilidad al experimento.

A continuación, se presenta el orden de hormigonado de los diferentes tipos de mezclas:

Tabla 12. Orden de hormigonado de tratamientos.

Orden de Hormigonado	Tipo de Mezcla
1	Mezcla Base
2	100% Fibra Reciclada
3	50% Fibra Normalizada
4	100% Fibra Normalizada-50% Reciclada
5	100% Fibra Normalizada
6	50% Fibra Reciclada
7	100% Fibra Normalizada-100% Reciclada
8	50% Fibra Normalizada
9	50% Fibra Normalizada-100% Reciclada
10	50% Fibra Normalizada-50% Reciclada
11	100% Fibra Normalizada-50% Reciclada
12	100% Fibra Normalizada
13	50% Fibra Normalizada-100% Reciclada
14	Mezcla Base
15	100% Fibra Normalizada
16	100% Fibra Reciclada
17	100% Fibra Normalizada-100% Reciclada
18	50% Fibra Normalizada-50% Reciclada
19	50% Fibra Normalizada-50% Reciclada
20	100% Fibra Reciclada
21	100% Fibra Normalizada-50% Reciclada
22	50% Fibra Normalizada
23	50% Fibra Reciclada
24	100% Fibra Normalizada-100% Reciclada
25	50% Fibra Normalizada-100% Reciclada
26	Mezcla Base
27	50% Fibra Reciclada

## CAPÍTULO III: DOSIFICACIÓN Y MEZCLADO DE CONCRETO

El proceso de fabricación de concreto autocompactante sigue procedimientos diferentes a los de concreto convencional, siendo las propiedades en estado fresco de más importancia. Los métodos de diseño usan el volumen como factor primario, con el fin de rellenar los vacíos entre partículas de la mezcla, otros buscan definir curvas granulométricas óptimas, así como existen métodos que buscan la fluidez y estabilidad de las pastas (GPE, 2006).

Para el diseño de concretos autocompactantes no existe un método normalizado, a pesar de que varios métodos han sido presentados por varios autores e instituciones. Los más utilizados son el método general de Okamura y Ouchi (1997), el método CBI (Swedish Cement and Concrete Research Institute), el método EFNARC (2002) y el método ACI (2007).

A continuación, se presenta parámetros básicos para el diseño de CAC (Fernández & Burón, 2005):

1. Elegir la cantidad y el tipo adecuado de cemento.
2. Fijar una relación A/C en función de la durabilidad y resistencia deseada.
3. Asegurar adecuada viscosidad mediante el estudio de la composición de la pasta.
4. Incluir aditivo superplastificante.
5. Fijar el contenido de aire, el cual está alrededor del 2%, salvo ciertas exigencias de exposición.

### 3.1. Dosificación del CAC Base

Tras la participación, en representación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca, en el tercer concurso nacional de hormigones realizado por la INECYC en febrero del 2015 y en el concurso FRP Composites Competition realizado por el ACI en abril del mismo año, se obtuvo una dosificación de concretos de alta resistencia. Esta dosificación sufrió ciertas modificaciones en su composición, dando como resultado la dosificación de concreto autocompactante base empleada en el presente trabajo.

La dosificación de la mezcla base se logró en base de experimentación básica como es la prueba y error, es decir, variando un factor a la vez; ya sea este la relación A/C o la cantidad de aditivo superplastificante.

A continuación, se presenta la dosificación base utilizada para un lote de mezcla, el cual fue calculado para 5 cilindros de 10 cm de diámetro por 20 cm de alto, y una vigueta de 15cm x 15cm x 53.5 cm:

*Tabla 13. Dosificación por lote para hormigonado.*

Material	Cantidad (kg)
Arena	6.143
Gravilla	18.261
Agua	3.934
Cemento	11.203
Arena de Colma Fina	5.882
Aditivo Viscocrete 2100	0.201

Las cantidades por metro cúbico de concreto son las siguientes:

*Tabla 14. Dosificación por metro cúbico de hormigonado.*

Material	Cantidad (kg)
Arena	337.83
Gravilla	918.03
Agua	197.77
Cemento	563.21
Arena de Colma Fina	295.70
Aditivo Viscocrete 2100	10.11

Las principales relaciones entre los componentes de la mezcla de los concretos autocompactantes se presentan en la tabla 15.

*Tabla 15. Relaciones para concretos autocompactantes.*

Relación	Valor
Af/Ag	0.69
Va/Vf	1.01
Pasta/Ag	1.83

*Nota: Af es el volumen de árido fino, Ag es el volumen de árido grueso, Va es el volumen de agua.*

### **3.2. Dosificación de CAC con inclusión de Fibras**

La dosificación de CAC que incluyen fibras, tanto recicladas como comerciales o normalizadas, es la misma dosificación que el CAC base, más la adición de la cantidad de fibras establecida en el Capítulo II. Como se indicó anteriormente en el mismo apartado, se respetó las recomendaciones de la casa comercial a cerca de la cantidad de fibras por metro cúbico de concreto.

*Tabla 16. Cantidades de fibras por tratamiento*

Tipo de Mezcla	Fibra Reciclada	Fibra
----------------	-----------------	-------



---

	(kg/m <sup>3</sup> )	Normalizada (kg/m <sup>3</sup> )
Mezcla Base	0.00	0.00
50% Fibra Normalizada	0.00	2.25
50% Fibra Reciclada	2.25	0.00
100% Fibra Normalizada	0.00	4.50
100% Fibra Reciclada	4.50	0.00
50% Fibra Normalizada-50% Reciclada	2.25	2.25
100% Fibra Normalizada-50% Reciclada	2.25	4.50
50% Fibra Normalizada-100% Reciclada	4.50	2.25
100% Fibra Normalizada-100% Reciclada	4.50	4.50

---

La mezcla que mayor contenido de fibras en peso tiene es la mezcla con 100% de Fibras Normalizada y 100% de Fibras Recicladas. El peso total de fibras en este tratamiento es de 9 kg por metro cúbico de concreto, siendo este el máximo recomendado por el fabricante de las fibras Normalizadas Sika.

### 3.3. Proceso estandarizado de mezclado

La estandarización significa crear un modo consistente de realización de tareas y procedimientos. La estandarización de operaciones significa que cualquier persona puede realizar dicha operación (Dorbessan, 2006). Al existir un proceso estandarizado para el mezclado del concreto, puede decirse que la variabilidad debido a factores involucrados con el mezclado será de importancia mínima.

Para el hormigonado de cada tratamiento, se siguieron los siguientes pasos, posmezclado y durante el mismo:

Prerrequisitos:

- Asegurar condiciones correctas para el funcionamiento de la máquina mezcladora de concreto.
- Utilizar equipo de protección tal como: guantes y gafas.
- Garantizar la dosificación de materiales necesarios para el mezclado.
- Humedecer equipos y herramientas que estarán en contacto con la masa de concreto fresco.

Proceso:

- Mezclar agregado fino, cemento y fibras a utilizar.
- Depositar agregado grueso dentro de la máquina mezcladora.
- Colocar el 50 % de la cantidad de agua requerida para la mezcla.
- Mezclar durante 60 segundos.
- Agregar la mezcla de agregado fino, cemento y fibras.
- Diluir aditivo en agua restante.
- Incluir aditivo diluido en agua a la mezcla en un tiempo de 15 segundos.
- Mezclar durante 180 segundos.



## CAPTILUO IV: PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL CAC

### 4.1. En estado Fresco

Los requisitos específicos para el concreto autocompactante en estado fresco dependen del tipo de aplicación, y específicamente de las condiciones de confinamiento, relacionadas con la geometría del encofrado y la densidad del acero de refuerzo.

El concreto autocompactante en estado fresco debe cubrir los requisitos necesarios solicitados, que se caracterizan por la clase de flujo, la viscosidad, la capacidad de paso y la resistencia de segregación. La viscosidad, la capacidad de flujo y la resistencia a la segregación afectan a las propiedades in situ del concreto endurecido.

#### 4.1.1. Ensayo de escurrimiento

Este ensayo describe el flujo de una mezcla fresca y no confinada, y es requerido para todos los concretos autocompactantes, con el fin de cumplir las especificaciones dadas. Vale la pena recalcar que, para concretos autocompactantes compuestos por áridos con tamaño máximo nominal (TMN) mayor a 40 mm, esta prueba no es la adecuada.

El ensayo consiste en rellenar sin compactar con concreto en estado fresco un cono truncado de acero, llamado cono de Abrams, asentado sobre una placa o bandeja plana, lisa y nivelada. A continuación, se realiza una marca en forma de circunferencia a 50 cm de diámetro con referencia a un centro marcado. Se retira el cono en forma vertical, se mide el tiempo desde el inicio del movimiento vertical hasta que el concreto haya fluido hasta 50 cm de diámetro. Este tiempo es conocido como  $T_{50}$ . Finalmente se mide el mayor diámetro alcanzado por el flujo de concreto y el diámetro perpendicular a este.

A continuación, se presentan las clases de escurrimientos y su posible aplicación, según las Directrices Europeas para el Hormigón Autocompactante (GPE, 2006):

*Tabla 17. Asentamiento por clase de concreto autocompactante.*

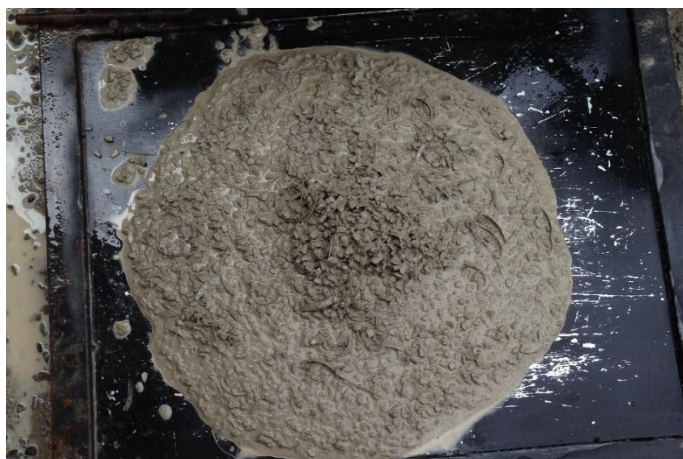
Clase	Asentamiento (mm)
SF1	de 550 a 650
SF2	de 660 a 750
SF3	de 760 a 850

En uso de concretos SF1 es apropiado en estructuras con poca densidad de armaduras y en estructuras que se requiera de concreto lanzado.

Concretos SF2 son adecuados para aplicaciones normales como muros, pilares, etc.

El tipo SF3 se usa principalmente para aplicaciones verticales en estructuras muy armadas, de formas complejas o para rellenos bajo los encofrados.

En todos los ensayos, los escurrimientos finales de las mezclas se encontraban dentro del rango de 660 a 750 mm, por lo que, las mezclas de concreto autocompactantes pertenecen a la clase SF2, lo que significa un comportamiento adecuado para aplicaciones normales.



*Ilustración 13. Ensayo escurrimiento.*

#### 4.1.2. Viscosidad

El tiempo  $T_{50}$  describe el índice de flujo, por lo que la viscosidad puede ser estimada a partir de este tiempo. Un concreto de alta viscosidad tendrá un flujo continuo por un tiempo considerable. Por otro lado, en concreto con baja viscosidad tendrá un flujo inicial rápido y luego este se detendrá. (GPE, 2006). A continuación, se muestran las clases de viscosidad:

*Tabla 18. Viscosidad por asentamiento del concreto.*

Clase	$T_{50}$ (s)
VS1/VF1	$\leq 2$
VS2/VF2	$>2$

La clase VS1/VF1 tiene una gran capacidad de relleno incluso en elementos que contenga gran densidad de armadura. Este concreto es autonivelante y presenta un mejor acabado superficial una vez endurecido el concreto.

La clase VS2/VF2 tiene riesgo de presentar tixotropía con el aumento de tiempo del flujo, así como puede presentarse efectos negativos en el acabado superficial.

A continuación, se muestran los resultados de los tiempos  $T_{50}$  de las mezclas realizadas:

*Tabla 19. Asentamiento  $T_{50}$  para cada replica por tratamiento.*

Tratamiento	Tiempo $T_{50}$ (s)	Tratamiento	Tiempo $T_{50}$ (s)
Mezcla Base	13.24	100% Fibra Normalizada	28.14
100% Fibra Reciclada	19.71	100% Fibra Reciclada	11.02
50% Fibra Normalizada	25.96	100% Fibra Normalizada-100% Reciclada	28.62
100% Fibra Normalizada-50% Reciclada	25.35	50% Fibra Normalizada-50% Reciclada	21.76
100% Fibra Normalizada	27.12	50% Fibra Normalizada-50% Reciclada	29.26
50% Fibra Reciclada	23.09	100% Fibra Reciclada	18.89
100% Fibra Normalizada-100% Reciclada	29.81	100% Fibra Normalizada-50% Reciclada	27.57
50% Fibra Normalizada	23.12	50% Fibra Normalizada	14.09
50% Fibra Normalizada-100% Reciclada	30.06	50% Fibra Reciclada	16.34
50% Fibra Normalizada-50% Reciclada	19.76	100% Fibra Normalizada-100% Reciclada	38.35
100% Fibra Normalizada-50% Reciclada	22.94	50% Fibra Normalizada-100% Reciclada	20.5
100% Fibra Normalizada	25.98	Mezcla Base	9.91
50% Fibra Normalizada-100% Reciclada	28.34	50% Fibra Reciclada	10.92
Mezcla Base	16.57		

Como se puede observar de la tabla 18, las mezclas en estado fresco se encuentran dentro de la clase VS2/VF2.

#### 4.1.3. Capacidad de paso

Se define como la capacidad de la mezcla en estado fresco de fluir a través de espacios confinados, estrechos y zonas densamente armadas, sin segregación. La geometría de la pieza a hormigonar, así como la densidad de la armadura son aspectos a considerar.

La capacidad de paso se determina mediante el ensayo de la caja en L. Debido a la falta de disponibilidad de los equipos necesarios en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería no se realizó este ensayo.

#### 4.1.4. Resistencia a la segregación

La resistencia a la segregación es un aspecto fundamental a considerar para mantener la homogeneidad y la calidad del concreto autocompactante, especialmente si se trata de concreto confeccionada in situ. La segregación se puede dar durante y después del colocado y antes del fraguado, especialmente en elementos altos. Se puede reducir la segregación con la inclusión de finos y de agentes que modifiquen la viscosidad (Cañizares, 2012).

#### 4.1.5. Contenido de fibras en mezcla fresca

El contenido de fibras en el concreto en estado fresco es un parámetro importante para determinar la uniformidad y calidad de la producción de concreto reforzado con fibras. Este método se basa en una prueba de lavado. Consiste en separar las fibras de la matriz. Este procedimiento se realiza cuando la matriz está fresca, ya que de esta manera es más fácil lavar la matriz a través de un tamiz adecuado, el cual retiene únicamente las fibras (Bentur et al., 2007).

Este procedimiento se realizó tanto para las fibras normalizadas como para las recicladas. El primer paso fue tomar una porción aleatoria de la mezcla en estado fresco de concreto, la cual tenía un peso de 2kg, seguido de un proceso de lavado por tamiz, como se explicó anteriormente. Finalmente se contó manualmente el número de fibras contenidas en la porción de mezcla. La tabla 20 presenta los resultados obtenidos del conteo de fibras realizado en las diferentes mezclas.

Tabla 20. Medias de conteos de fibras por tratamiento

Tipo de Mezcla	Cantidad de Fibras Normalizadas	Cantidad de Fibras Recicladas
Mezcla Base	0	0
50% Fibra Normalizada	71	0
50% Fibra Reciclada	0	17
100% Fibra Normalizada	125	0
100% Fibra Reciclada	35	0
50% Fibra Normalizada-50% Reciclada	40	18
100% Fibra Normalizada-50% Reciclada	105	19
50% Fibra Normalizada-100% Reciclada	52	35
100% Fibra Normalizada-100% Reciclada	96	32

#### 4.2. Estado endurecido

El concreto presenta características muy favorables en su estado endurecido, lo que le ha hecho un material de uso masivo. Las propiedades de mayor importancia son: resistencia a compresión y durabilidad. También hay propiedades importantes que permiten la profundización del estudio de este material, estos son: módulo de elasticidad y módulo de ruptura. La resistencia a compresión, el módulo de elasticidad y el módulo de ruptura se han planteado

como variables de respuesta en el experimento llevado a cabo, siendo estos los indicadores de mayor significancia (F. Carrasco, n.d.)

Los ensayos sobre concreto endurecido no disponen de una normativa universal, por lo que cada país propone de su propia, es por esto, que los valores obtenidos pueden ser muy dispersos. En el presente trabajo se siguió la normativa estadounidense ASTM, base de la normativa ecuatoriana actual INEN.



*Ilustración 14. Probetas cilíndricas durante el curado.*



*Ilustración 15. Probetas prismáticas previas a ensayo.*

## **Propiedades mecánicas:**

### **4.2.1. Resistencia a compresión simple**

La resistencia a la compresión del concreto es la medida más común de desempeño que emplean los ingenieros para diseñar diversas estructuras y edificaciones. La resistencia a la compresión se puede determinar directamente por medio de pruebas destructivas, aplicadas a probetas de concreto cilíndricas



de tamaños normados, en una prensa hidráulica de ensayos de compresión. A pesar de la facilidad de realización del ensayo, este caracteriza de muy buena manera el concreto.

El concreto autocompactante, con una relación agua / cemento similar a la de un concreto convencional vibrado, tendrá normalmente un valor de resistencia a la compresión superior. Esto se debe a que la falta de vibrado da una mayor interface entre el árido y la pasta endurecida. Algunas de las propiedades del hormigón están relacionadas con la resistencia a la compresión del hormigón, que es la única propiedad estructural que se especifica y se ensaya de forma sistemática (EFNARC, 2002).

Para el ensayo de las probetas cilíndricas de concreto, de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura, se siguió el procedimiento establecido por la norma (ASTM C 39, 2016). El equipo utilizado fue una prensa hidráulica de marca “Tinius Olsen” y un escalímetro para tomar las respectivas medidas de la probeta. Por falta de uniformidad en la capa de acabado de la probeta cilíndrica de concreto, se procedió al capeado de las mismas con azufre, siguiendo los procedimientos descritos en la norma (ASTM C 617, 2015).



*Ilustración 16. Ensayo resistencia compresión simple.*

Las probetas cilíndricas de concreto fueron medidas previo al ensayo, tomando en cuenta como medida de diámetro el promedio entre dos medidas perpendiculares entre sí. Asimismo, se tomó el valor de la altura de cada probeta. Posteriormente se procedió a realizar el capeado de probetas con azufre con el fin de uniformizar y regular las superficies de ensayo de las probetas. Se realizó el ensayo de compresión simple a las probetas cilíndricas a los 28 días de edad, en seguida tras retirarlas de la piscina de curado, tal como indica la norma (ASTM C 39, 2016). La carga aplicada a las probetas se mantuvo dentro de una velocidad de  $0.25 \pm 0.05$  MPa/s en forma continua, evitando impactos sobre estas. Se tomó los datos de carga máxima del ensayo y tipo de falla.

### Procesamiento de datos:

Para obtener el valor de la resistencia a compresión de una probeta cilíndrica de concreto se calcula mediante una relación entre la carga de ruptura dividida entre el área de la sección que resiste a la carga.

$$f'_c = \frac{\text{Carga máxima}}{\text{Area sección}} \quad (23)$$

### Resultados:

Se obtuvo la resistencia a compresión de cada mezcla realizada. Los resultados de las mismas se presentan en el Anexo 1.

A continuación, se presenta el promedio de los resultados obtenidos de los ensayos a compresión simple de las probetas cilíndricas de concreto.

*Tabla 21. Media resistencia a compresión por tratamiento.*

Tipo de Mezcla	Promedio Resistencia a compresión (kg/cm <sup>2</sup> )
Mezcla Base	350.31
50% Fibra Normalizada	390.02
50% Fibra Reciclada	374.89
100% Fibra Normalizada	399.32
100% Fibra Reciclada	366.24
50% Fibra Normalizada-50% Reciclada	367.47
100% Fibra Normalizada-50% Reciclada	362.70
50% Fibra Normalizada-100% Reciclada	344.39
100% Fibra Normalizada-100% Reciclada	398.80

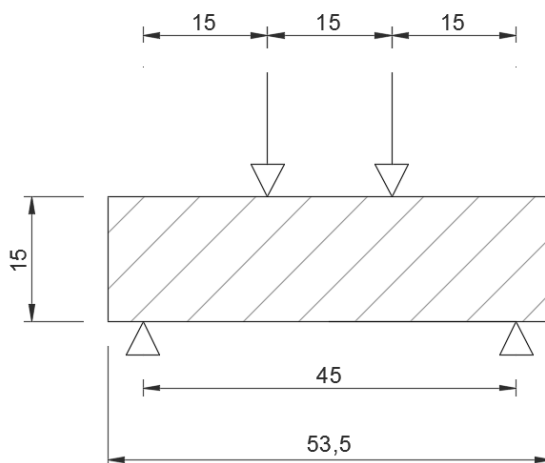
### 4.2.2. Módulo de Ruptura

La resistencia a la flexión del concreto es una medida indirecta de la resistencia a la tracción del concreto. Es una medida de la resistencia a la falla por momento de una viga o losa de concreto no reforzada. Se mide mediante la aplicación de cargas a vigas de concreto de 150 x 150 mm de sección transversal y con luz de como mínimo tres veces el espesor. La resistencia a la flexión se denomina como el Módulo de Ruptura.



*Ilustración 17. Ensayo módulo de ruptura.*

Como se mencionó anteriormente en el Capítulo III, se confeccionó una vigueta por cada mezcla, cuyas dimensiones son 15cm x 15cm x 53.5cm. Como primer paso de la metodología de ensayo se tomó medidas de las dimensiones de las viguetas, así como su peso. A continuación, se procedió a ensayar las viguetas a una edad de 28 días de edad, en seguida tras retirarlas de la piscina de curado. Las viguetas se asentaron centradas sobre dos apoyos separados a 45 cm. Dos cargas puntuales fueron aplicadas a los tercios medios de la luz libre de 45 cm, como se indica en la Ilustración 18, tal como especifica la norma (ASTM C 78, 2002). Una vez ubicada las viguetas en posición correcta, se procedió a la aplicación de carga mediante una prensa hidráulica de marca “ELE” con velocidad constante de carga. Una vez ensayado el elemento se tomó el dato la carga máxima de ruptura.



*Ilustración 18. Esquema de ensayo para módulo de ruptura. (cm)*

Procesamiento de datos:



Si la fractura o grieta del elemento se encuentra dentro del tercio medio entre apoyos, es decir, entre la distancia separada por las cargas puntuales, el módulo de ruptura se determina mediante la siguiente ecuación:

$$R = \frac{PL}{bd^2} \quad (24)$$

Donde:

$R$  = módulo de ruptura, en MPa.

$P$  = carga máxima aplicada, en N.

$L$  = luz libre, en mm.

$b$  = promedio del ancho de espécimen, en mm.

$d$  = promedio de la altura del espécimen, en mm.

Resultados:

En todos los casos, las grietas se encontraron dentro del tercio medio central. Los resultados de cargas máximas resistentes y módulos de ruptura de las viguetas, junto con sus respectivas dimensiones y pesos, se encuentran en el Anexo 2. A continuación, se presentan los resultados del promedio de los módulos de ruptura obtenidos de las vigas confeccionadas.

Tabla 22. Medias del módulo de ruptura por tratamiento.

Tipo de Mezcla	Promedio Módulo de Ruptura (kg/cm <sup>2</sup> )
Mezcla Base	65.99
50% Fibra Normalizada	67.68
50% Fibra Reciclada	67.19
100% Fibra Normalizada	62.00
100% Fibra Reciclada	62.59
50% Fibra Normalizada-50% Reciclada	61.01
100% Fibra Normalizada-50% Reciclada	64.71
50% Fibra Normalizada-100% Reciclada	61.34
100% Fibra Normalizada-100% Reciclada	62.73

Las viguetas conformadas por la mezcla base sin adición de fibras se fracturaba en dos pedazos, mientras que las viguetas que contenían fibras se mantenían juntas, ya que las fibras cosían la fisura.



*Ilustración 19. Fractura en vigueta con la inclusión de fibras comerciales.*

#### 4.2.3. Módulo de elasticidad

Comúnmente el módulo de elasticidad ( $E$ ) es usado para el cálculo de la rigidez y deformación elástica de elementos, siendo este a menudo un parámetro de control en el diseño de elementos de hormigón armado, de elementos pretensados y postensados. En consecuencia de que la mayor parte del volumen en el concreto son los áridos, el tipo y la cantidad de áridos empleados, así como el valor de su módulo elástico, tienen gran influencia en el valor final del módulo de elasticidad del concreto. La selección de un árido con un valor  $E$  elevado incrementa el módulo de elasticidad  $E$  del concreto. Sin embargo, el incremento del volumen de pasta podría disminuir el valor de  $E$ . Puesto que a menudo el CAC tiene un mayor contenido de pasta que el hormigón vibrado convencional, cabe esperar ciertas diferencias, siendo el valor  $E$  menor (GPE, 2006).

Por deformación:

Para obtener el módulo de elasticidad estático ( $E_c$ ) se capearon con azufre las probetas cilíndricas para emparejar y regularizar las superficies siguiendo los procedimientos descritos en la norma (ASTM C 617, 2015), además se hizo uso de una prensa hidráulica de marca “Tinius Olsen”, un medidor de deformación vertical y un extensómetro, para dar la carga a una velocidad constante, medir deformaciones verticales y diametrales respectivamente. Se siguió el procedimiento descrito en la norma (ASTM C 469, 2014).

Los datos fueron recopilados obteniendo una carga y la deformación transversal por cada 0.01 mm de deformación vertical. Es necesario considerar que la carga máxima que debe soportar el equipo de deformaciones corresponde al 65% de la carga máxima resistente por el espécimen.

El módulo de elasticidad por deformaciones se determina con la siguiente ecuación:

$$E_c = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_1 - 0.000050} \quad (25)$$

Donde:

$E_c$  = módulo de elasticidad estático, en  $kg/cm^2$ .

$S_2$  = esfuerzo equivalente al 65% de la resistencia, en  $kg/cm^2$ .

$S_1$  = esfuerzo correspondiente a una deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas,  $kg/cm^2$ .

$\varepsilon_1$  = deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo  $S_2$ .

#### Resultados:

A continuación, se presenta el promedio de los módulos elásticos de las probetas cilíndricas de concreto de las mezclas. Adicionalmente en el Anexo 3 se presenta todos los módulos de elasticidad de las mezclas, así como un enlace a una página de almacenamiento virtual donde se exponen los datos de deformaciones, módulos de elasticidad, gráficos esfuerzo-deformación y relación Poisson.

Tabla 23. Medias de módulo elástico por tratamiento.

Tipo de Mezcla	Promedio Módulo Elástico (kg/cm <sup>2</sup> )
Mezcla Base	54744.31
50% Fibra Normalizada	47890.77
50% Fibra Reciclada	56319.14
100% Fibra Normalizada	47556.82
100% Fibra Reciclada	53048.71
50% Fibra Normalizada-50% Reciclada	46967.92
100% Fibra Normalizada-50% Reciclada	47328.39
50% Fibra Normalizada-100% Reciclada	44548.62
100% Fibra Normalizada-100% Reciclada	52700.87

Las gráficas de esfuerzo – deformación correspondiente a las diferentes mezclas se muestran en el Anexo 4.

Los resultados del módulo de elasticidad, obtenidos por deformaciones en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca, son valores poco representativos, por lo que no son confiables, ya que estos no describen el comportamiento de un material como el concreto. Los valores obtenidos son significativamente bajos, en comparación con los alcanzados por otros métodos. Con el fin de comparar y estudiar los resultados logrados en el laboratorio de la universidad de Cuenca, se confeccionó 6 probetas cilíndricas de la mezcla base sin la adición de fibras, de 30 cm de alto y 15 cm de diámetro. Tres probetas se ensayaron en el laboratorio de la Universidad de Cuenca, obteniendo su resistencia a compresión y módulo elástico por deformaciones, como se muestra en la tabla 24. Las tres probetas restantes fueron ensayadas en el laboratorio Labscon, ubicado en la calle Manuel Dávila 1-52 y Av. Remigio Crespo, obteniendo su resistencia a compresión y módulo elástico por deformaciones, como se muestra en la tabla 25.

Tabla 24. Módulos de Elasticidad y  $f'_c$  obtenidos en el laboratorio de la Universidad de Cuenca.

Probeta	Módulo de Elasticidad (kg/cm <sup>2</sup> )	$f'_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )
1	72050	422.9
2	56807	423.57
3	49672	417.24
Mediana	56807	423

Tabla 25. Módulos de Elasticidad y  $f'_c$  obtenidos en el laboratorio Labscon.

Probeta	Módulo de Elasticidad (kg/cm <sup>2</sup> )	$f'_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )
4	309263	447.33
5	281314	495.14
6	288786	495.94
Mediana	288786	495

Se obtuvo la mediana de los módulos de elasticidad obtenidos en los diferentes laboratorios, y mediante el cociente entre ambos se obtuvo un factor de corrección, el cual fue aplicado a todos los módulos de elasticidad de las diferentes mezclas:

$$\text{factor de corrección} = \frac{288786}{56807} = 5.084$$



Ilustración 20. Ensayo de Módulo de Elasticidad a probeta cilíndrica.

A continuación, se presenta el promedio de los módulos elásticos corregidos de las probetas cilíndricas de concreto de las mezclas. Adicionalmente en el Anexo 3, se presenta el informe emitido por el laboratorio Labscon:

Tabla 26. Medias del módulo elástico corregido por factor de corrección por tratamiento.

Tipo de Mezcla	Promedio Módulo
----------------	-----------------

	Elástico (kg/cm <sup>2</sup> )
Mezcla Base	278320
50% Fibra Normalizada	243477
50% Fibra Reciclada	286327
100% Fibra Normalizada	241779
100% Fibra Reciclada	269700
50% Fibra Normalizada-50% Reciclada	238785
100% Fibra Normalizada-50% Reciclada	240618
50% Fibra Normalizada-100% Reciclada	226485
100% Fibra Normalizada-100% Reciclada	267931

Por ultrasonido:

El módulo de elasticidad estático ( $E_c$ ) del concreto también puede determinarse a partir de la velocidad de propagación de onda de ultrasonido, siendo esta una medida indirecta del módulo de elasticidad dinámico. Este procedimiento es un ensayo no destructivo del concreto, ya que únicamente es necesario un ultrasonido y el espécimen de concreto. El módulo de elasticidad dinámico se determina a partir de la velocidad longitudinal de ondas de compresión, según (Fernández Cánovas, 2013) y vendrá dado por:

$$E_d = V^2 * \frac{\gamma}{g} * \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad (26)$$

Donde:

$E_d$ = módulo dinámico de elasticidad del concreto, en  $kg/cm^2$ .

$V$ = velocidad longitudinal de onda, en  $m/s$ .

$g$ = aceleración de la gravedad, en  $m/s^2$ .

$\gamma$ = densidad del concreto, en  $kg/m^3$ .

$\nu$ = coeficiente de Poisson.

La velocidad longitudinal de onda se obtuvo mediante el procedimiento expuesto en el apartado 4.2.6. El coeficiente de Poisson se tomó como valor medio 0.2 (Fernández Cánovas, 2013). Para concretos con contenido de cemento sobre los 500  $kg/m^3$ , el módulo estático en función del módulo dinámico viene dado por la siguiente ecuación (Cossolino, Pereira, & Debs, 2011):

$$E_c = 0.83 * E_d \quad (27)$$

En la tabla 27 se muestra los resultados promedio de los módulos de elasticidad, tanto dinámico como estático. En el Anexo 3 se muestra el resultado de todos los ensayos realizados.

Tabla 27. Medias de velocidad de ultrasonido por tratamiento.

Tipo de Mezcla	Tiempo ( $\mu s$ )	Velocidad (m/s)	E. Dinámico (kg/cm <sup>2</sup> )	E. Estático (kg/cm <sup>2</sup> )
----------------	--------------------	-----------------	-----------------------------------	-----------------------------------

Mezcla Base	35.00	4290.00	388551.59	322497.82
50% Fibra Normalizada	35.63	4213.33	374888.75	311157.66
50% Fibra Reciclada	35.47	4230.00	377687.43	313480.57
100% Fibra Normalizada	35.23	4256.67	382369.02	317366.29
100% Fibra Reciclada	36.00	4170.00	367028.65	304633.78
50% Fibra Normalizada-50% Reciclada	35.37	4243.33	380011.35	315409.42
100% Fibra Normalizada-50% Reciclada	35.90	4183.33	369442.60	306637.36
50% Fibra Normalizada-100% Reciclada	36.03	4166.67	366528.56	304218.71
100% Fibra Normalizada-100% Reciclada	35.20	4263.33	383547.86	318344.72

### Por ecuación del ACI

Como base teórica, el ACI presenta una ecuación capaz de adaptarse distintos tipos de concretos y se encuentra en función de su resistencia a compresión simple (ACI, 2014). Debido a que, como se mencionó con anterioridad, el módulo de elasticidad está en función de los materiales componentes del concreto, por lo que esta ecuación se puede tomar como una aproximación.

$$E_c = 15100\sqrt{f'_c} \quad (28)$$

Donde:

$E_c$ = módulo de elasticidad del concreto, en  $kg/cm^2$ .

$f'_c$ = resistencia a compresión simple del concreto a 28 días de edad, en  $kg/cm^2$ .

En la tabla 28 se presentan los datos promedio de los módulos de elasticidad obtenidos por la ecuación del ACI de las diferentes mezclas. En el Anexo 3, se presenta los valores de los módulos de elasticidad de todas las mezclas.

*Tabla 28. Medias del módulo elástico calculado con la ecuación ACI por tratamiento.*

Tipo de Mezcla	Promedio Módulo Elástico (por ecuación ACI)
Mezcla Base	294754.82
50% Fibra Normalizada	302704.54
50% Fibra Reciclada	290240.43
100% Fibra Normalizada	303226.09
100% Fibra Reciclada	295598.14
50% Fibra Normalizada-50% Reciclada	302881.44
100% Fibra Normalizada-50% Reciclada	300180.50
50% Fibra Normalizada-100% Reciclada	292855.50
100% Fibra Normalizada-100% Reciclada	276974.38

#### 4.2.4. Relación de Poisson

La relación de Poisson de un concreto es un parámetro fundamental en el análisis estructural para poder determinar la distribución de esfuerzos y desplazamientos, especialmente cuando estructuras son diseñadas bajo consideraciones elásticas (Sideris, Manita, & Sideris, 2004). A la relación entre la deformación unitaria lateral y la deformación unitaria longitudinal, dentro del rango elástico, de un elemento cargado axialmente, se lo conoce como relación de Poisson.

El valor del coeficiente de Poisson está en función de la relación Poisson de la pasta y de la resistencia de los agregados. Este incrementa con la edad del concreto, debido a que este coeficiente se determina a partir de la resistencia a compresión del concreto.

La relación de Poisson de las diferentes mezclas de CAC, fue determinado de acuerdo a la norma (ASTM C 469, 2014). En las probetas cilíndricas se colocó medidores de deformación transversal y axial, llamados compresómetros y extensómetros respectivamente. De igual manera que los ensayos antes mencionados, los cilindros fueron capeados con azufre. El espécimen fue cargado con carga continua axialmente, a través de la prensa hidráulica, registrando la carga, la deformación longitudinal y la deformación transversal. Estos valores fueron tomados por cada 0.010 mm de deformación longitudinal, hasta una carga igual al 65% de la carga máxima de ruptura. La relación de Poisson se determina de la siguiente manera:

$$\mu = \frac{\varepsilon_{t2} - \varepsilon_{t1}}{\varepsilon_1 - 0.000050} \quad (29)$$

$\mu$ = Relación de Poisson.

$\varepsilon_{t2}$ = Deformación unitaria transversal, a la mitad de la altura del espécimen, producida por el esfuerzo  $S_2$ .

$\varepsilon_{t1}$ = Deformación unitaria transversal, a la mitad de la altura del espécimen, producida por el esfuerzo  $S_1$ .

$\varepsilon_1$ = Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo  $S_2$ .

En el Anexo 6 se muestran las relaciones de Poisson de todas las mezclas realizadas. En la tabla 29 se presentan los resultados promedio de la relación de Poisson de muestras confeccionadas:

Tabla 29. Relación de Poisson por tratamiento.

Tipo de Mezcla	Relación de Poisson
Mezcla Base	0.07
50% Fibra Normalizada	0.04
50% Fibra Reciclada	0.05



---

100% Fibra Normalizada	0.05
100% Fibra Reciclada	0.06
50% Fibra Normalizada-50% Reciclada	0.07
100% Fibra Normalizada-50% Reciclada	0.06
50% Fibra Normalizada-100% Reciclada	0.05
100% Fibra Normalizada-100% Reciclada	0.06

---

Los valores obtenidos para la relación de Poisson de los diferentes tipos de CAC realizados, no representan el comportamiento real del concreto, ya que estos valores son muy bajos, indicando que el material es extremadamente frágil y poco deformable.

### Propiedades físicas:

Los concretos presentan varias propiedades físicas que son de importancia y se relacionan de manera directa con sus propiedades mecánicas. Estas propiedades de un concreto en estado endurecido dependen de su naturaleza, así como de condiciones de exposición de temperatura y humedad. Además, estas propiedades pueden ser una medida indirecta de la resistencia a compresión y la durabilidad del concreto.

#### 4.2.5. Densidad

La densidad del concreto es una de las propiedades que se relacionan de forma directa con la durabilidad tanto como con la resistencia a compresión del concreto. Esta propiedad depende en gran medida del tipo de árido utilizado en la composición de la mezcla y cantidad de aire incluida. Una densidad elevada puede ser índice de buenas características mecánicas y buena durabilidad del concreto endurecido. Como idea general, se puede decir que para dos concretos de iguales componentes y de igual naturaleza, la variación de densidad dependerá de la compactación, es decir, de la cantidad de huecos que contenga el concreto.

Para obtener la densidad del concreto se ha procedido a la medición de las probetas cilíndricas y al pesaje de las mismas para de esta manera, hacer uso de la relación entre el peso y el volumen de la probeta cilíndrica, se utilizó la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (30)$$

Donde:

$\rho$ = densidad del concreto, en  $kg/m^3$ .

$m$ = masa de las probetas, en  $kg$ .

$V$ = volumen de la probeta, en  $m^3$ .

A continuación, se presenta los resultados de densidad para cada tipo de concreto confeccionado, tomando como valor la media de dos probetas confeccionadas.



Tabla 30. Medias de densidad por tratamiento.

Tipo de Mezcla	Promedio Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
Mezcla Base	2242.51
50% Fibra Normalizada	2254.00
50% Fibra Reciclada	2255.76
100% Fibra Normalizada	2254.94
100% Fibra Reciclada	2265.50
50% Fibra Normalizada-50% Reciclada	2263.06
100% Fibra Normalizada-50% Reciclada	2227.55
50% Fibra Normalizada-100% Reciclada	2252.71
100% Fibra Normalizada-100% Reciclada	2255.41

#### 4.2.6. Velocidad de propagación de ultrasonido

La velocidad de propagación de onda en un concreto mantiene íntima relación con su resistencia a compresión, tendiendo esta hacia una relación parabólica, es decir, a medida que el concreto envejece y aumenta su resistencia, la velocidad de propagación de ondas ultrasónica aumente. El valor de la velocidad de onda depende de ciertos factores en el concreto, como es la relación agua/cemento, granulometría, presencia de aire en el concreto y de las condiciones de curado (Fernández Cánovas, 2013).

La prueba de velocidad de propagación de ondas de ultrasonido mide la velocidad de una onda ultrasónica que atraviesa el concreto. En esta prueba, la velocidad de propagación de onda se determina a través del cociente entre la distancia entre los transductores y el tiempo que tarda la onda en desplazarse entre ellos (Mamlouk & Zaniewski, 2009). Pueden existir correlaciones entre este parámetro y ciertas propiedades mecánicas del concreto. La velocidad de propagación de onda es dependiente de la edad del concreto, la relación árido cemento, tipo de árido y humedad.

El autor Manuel Fernández Cánovas (Fernández Cánovas, 2013) expresa la calidad del concreto en función de rangos de la velocidad de propagación de onda, presentados en la tabla 31.

Tabla 31. Caracterización del concreto por velocidad de ultrasonido.

Velocidad de propagación lineal (m/s)	Calidad del concreto
≥4500	Excelente
3600 a 4500	Bueno
3000 a 3600	Aceptable
2100 a 3000	Malo
≤2100	Muy malo



*Ilustración 21. Ensayo de velocidad de onda.*

Para el ensayo de velocidad de propagación de onda de ultrasonido se siguió el procedimiento descrito en la norma (ASTM C 597, 2016). Como primer paso se obtuvo el número de rebotes de la mezcla base con el esclerómetro, obteniendo como resultado 56 rebotes. A continuación, se calibro el ultrasonido de marca “PROCEQ TICO” con el dato obtenido por el esclerómetro. El ensayo se realizó en las viguetas de cada mezcla, colocando los electrodos cara a cara con una separación de 15 cm, obteniendo la medición de la velocidad de onda directa. En el Anexo 5 se presentan los resultados del tiempo y la velocidad de onda obtenidos por cada concreto confeccionado. Se muestra a continuación los resultados promedios obtenidos del ensayo descrito:

*Tabla 32. Medias de velocidad ultrasonido por tratamiento.*

Tipo de Mezcla	Tiempo ( $\mu$ s)	Velocidad (m/s)
Mezcla Base	35.00	4290.00
50% Fibra Normalizada	35.63	4213.33
50% Fibra Reciclada	35.47	4230.00
100% Fibra Normalizada	35.23	4256.67
100% Fibra Reciclada	36.00	4170.00
50% Fibra Normalizada-50% Reciclada	35.37	4243.33
100% Fibra Normalizada-50% Reciclada	35.90	4183.33
50% Fibra Normalizada-100% Reciclada	36.03	4166.67
100% Fibra Normalizada-100% Reciclada	35.20	4263.33

## CAPÍTULO V: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presenta en la tabla 33 un resumen con los resultados de cada propiedad del concreto en estado fresco y endurecido, ordenada por tratamiento con sus respectivas replicas.

*Tabla 33. Resumen de las propiedades de los concretos autocompactantes.*

Tratamiento	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Propiedad									
Resistencia compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	372	407	405	400	346	347	305	361	484
	322	409	368	396	389	389	412	334	352
	355	352	351	400	362	370	370	336	359
E por deformaciones corregido por factor (kg/cm <sup>2</sup> )	313550	277152	268079	283719	417375	353288	214396	258761	227615
	258427	244017	323178	228886	240901	179794	256337	281141	230313
	262983	209262	267723	212732	220193	347564	347564	300119	344991
Relación de Poisson	0.08	0.04	0.04	0.06	0.11	0.1	0.04	0.05	0.08
	0.08	0.06	0.04	0.04	0.07	0.04	0.04	0.07	0.04
	0.05	0.03	0.08	0.06	0.04	0.06	0.06	0.06	0.07
Módulo de Ruptura (kg/cm <sup>2</sup> )	69.02	68.67	71.77	65.86	62.91	57.39	69.02	61.98	65.31
	62.04	68.19	62.91	63.74	60.84	60.61	62.83	61.15	61.66
	64.52	66.19	66.90	56.39	64.03	65.03	62.27	60.91	61.21
Asentamiento T50 (s)	13.24	25.96	23.09	27.12	19.71	19.76	25.35	30.06	29.81
	16.57	23.12	16.34	25.98	11.02	29.26	22.94	20.5	28.62
	9.91	14.09	10.92	28.14	18.89	27.57	27.57	28.34	38.35

*El número de tratamiento se define en la Tabla 34. Tratamientos analizados.*

### 5. Análisis estadístico de la variación del concreto en estado fresco y endurecido

#### 5.1. Diseño completamente al azar

Con el fin de repartir equitativamente los posibles efectos ambientales y temporales sobre las pruebas realizadas, los lotes de concreto fueron confeccionados completamente al azar. A este diseño se lo conoce como diseño completamente al azar o DCA.

Como se explica con detalle en el Capítulo II, se tienen nueve tratamientos. En cada tratamiento se utilizó el mismo número de repeticiones (3 repeticiones), obteniendo un diseño balanceado. La tabla 34 presenta los tratamientos analizados:

*Tabla 34. Tratamientos analizados.*

#	Tratamiento

---

1	Mezcla Base
2	50% Fibra Normalizada (2.25 kg/m <sup>3</sup> )
3	50% Fibra Reciclada (2.25 kg/m <sup>3</sup> )
4	100% Fibra Normalizada (4.50 kg/m <sup>3</sup> )
5	100% Fibra Reciclada (4.50 kg/m <sup>3</sup> )
6	50% Fibra Normalizada (2.25 kg/m <sup>3</sup> ) - 50% Reciclada (2.25 kg/m <sup>3</sup> )
7	100% Fibra Normalizada (4.50 kg/m <sup>3</sup> ) - 50% Reciclada (2.25 kg/m <sup>3</sup> )
8	50% Fibra Normalizada (2.25 kg/m <sup>3</sup> ) - 100% Reciclada (4.50 kg/m <sup>3</sup> )
9	100% Fibra Normalizada (4.50 kg/m <sup>3</sup> ) - 100% Reciclada (4.50 kg/m <sup>3</sup> )

---

Un modelo estadístico lineal puede describir el efecto de un factor en un tratamiento:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad (31)$$

Donde:

$Y_{ij}$ = observación en el tratamiento.

$\mu$ = media global.

$\tau_i$ = parámetro que mide el efecto del tratamiento  $i$ .

$\varepsilon_{ij}$ = error de la medición  $Y_{ij}$ .

Ya que la media global de la variable respuesta no es variable, el modelo en un DCA tiene dos variables: los tratamientos y el error aleatorio. Una variación notable entre la respuesta media de un tratamiento particular y la respuesta media global indica que existe un efecto de dicho tratamiento, siendo esta diferencia estudiada por el análisis de varianza o ANOVA.

## 5.2. ANOVA simple

El análisis de datos experimentales de varianza (ANOVA) consta en separar la variación total en las fuentes de variación en el experimento. Cuando la variabilidad debida a los tratamientos predomina claramente sobre la variabilidad debida al error existe efecto en los tratamientos. El principal objetivo del ANOVA es responder a la hipótesis de igualdad de tratamientos con respecto a la media de la variable respuesta correspondiente. Esto se logra descomponiendo la variabilidad debida a los tratamientos y la correspondiente al error aleatorio (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2008).

La suma total de cuadrados es una media de la variabilidad total de las observaciones, y está dada por:

$$SC_T = \sum_{i=1}^k n_i (\bar{Y}_{i.} - \bar{Y}_{..})^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (\bar{Y}_{ij} - \bar{Y}_{i.})^2 \quad (32)$$

Donde:

$SC_T$  = suma total de cuadrados.

$\bar{Y}_{i.}$  = Media de las observaciones del i-ésimo tratamiento.

$\bar{Y}_{..}$  = Media global o promedio de todas las observaciones.

$k$  = número de tratamientos.

$n$  = observaciones.

El primer componente de la ecuación 33 es la suma de cuadrados de tratamientos ( $SC_{Trat}$ ) y el segundo es la suma de cuadrados del error ( $SC_E$ ).

$$SC_T = SC_{Trat} + SC_E \quad (33)$$

Debido a que existe un total de  $N = \sum_{i=1}^k n_i$  observaciones, la suma total de cuadrados tiene  $N-1$  grados de libertad,  $SC_{Trat}$  tiene  $k - 1$  grados de libertad y  $SC_E$  tiene  $N - k$ . La suma de los cuadrados divididos entre sus grados de libertad se los conoce como cuadrados medios:

$$CM_{Trat} = \frac{SC_{Trat}}{k-1} \quad (34) \quad \text{Y} \quad CM_E = \frac{SC_E}{N-k} \quad (35)$$

Los cuadrados medios estiman a la varianza  $\sigma^2$  cuando no existe un efecto en los tratamientos. En función de esto, se determina un estadístico de prueba que sigue una distribución con  $k - 1$  grados de libertad en el numerador y  $N - k$  en el denominador, dado por:

$$F_0 = \frac{CM_{Trat}}{CM_E} \quad (36)$$

Se acepta que se tiene efectos en los tratamientos cuando el valor del nivel de significancia  $\alpha$ , tomando para el estudio 95%, es mayor al valor  $P$ .

A continuación, se presenta la tabla de análisis de varianza (ANOVA), la cual contiene las directrices necesarias para determinar el estadístico  $F_0$  (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2008).

Tabla 35. Análisis ANOVA.

Fuente de variabilidad	Suma de cuadrados SC	GL	Cuadrado medio CM	Estadístico de prueba $F_0$	Valor $-P$
------------------------	----------------------	----	-------------------	-----------------------------	------------

Tratamientos	$SC_{Trat} = \sum_{i=1}^k n_i (\bar{Y}_i - \bar{Y}_{..})^2$	k-1	$CM_{Trat} = \frac{SC_{Trat}}{k-1}$	$\frac{CM_{Trat}}{CM_E}$	$P(F > F_0)$
Error	$SC_E = SC_T - SC_{Trat}$	N-k			
Total	$SC_T = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} Y_{ij}^2 - \frac{Y_{..}^2}{N}$				

Ademas del cuadro ANOVA, existen diversas representaciones gráficas y descriptivas para la comparación de tratamientos. En el presente trabajo se analiza los resultados por medio de diagrama de cajas simultaneos y por graficos de medias. El gráfico de cajas (o Bigotes) compara tratamientos por su tamaño, analizando el traslape o no traslape de estos, definido si puede o no haber diferencias significativas, por lo que se recomienda utilizar pruebas estadísticas para complementar el analisis. Al concluir que no existe igualdad entre las medias de los tratamientos, el gráfico de medias permite comparar visual y estadísticamente las medias de los tratamientos, con intervalo de confianza de acuerdo a la prueba de diferencia mínima significativa (LSD), que en este caso es del 95%. Si es que dos o mas elementos se traslapan sus tratamientos son estadísticamente iguales, en cuanto a las medias, y viceversa.

A continuacion se presentan los resultados obtenidos del analisis de ANOVA realizado a las variables respuestas de asentamiento, módulo elastico, módulo de ruptura, resistencia a compresion y velocidad de onda.

### 5.2.1. Asentamiento

Puesto que el valor-P de la prueba-F, como se muestra en la tabla 36, es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de asentamiento entre un nivel de un tratamiento y otro, con un nivel del 95.0% de confianza.

Tabla 36. Resumen análisis ANOVA para asentamiento  $T_{50}$ .

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	886.96	8	110.87	5.11	0.002
Intra grupos	390.909	18	21.7172		
Total (Corr.)	1277.87	26			

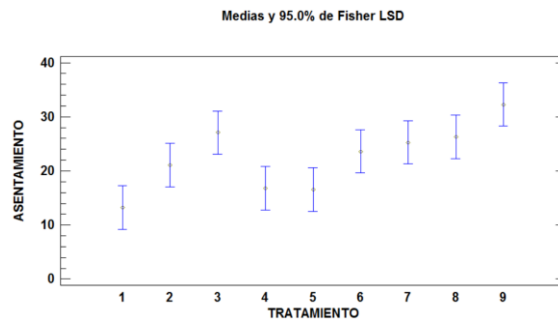


Ilustración 22. Medias con bordes para asentamiento.

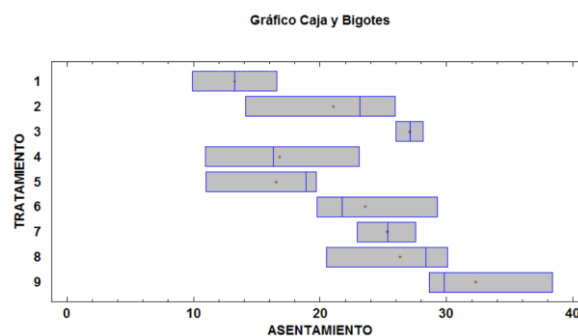


Ilustración 23. Gráfico de caja y bigotes para asentamiento.

Como se observa en la Ilustración 22, la media del tratamiento 9 tiene diferencias notables en el tiempo T50 con respecto a las medias de los tratamientos 1, 2, 4 y 5. El gráfico de cajas, representado en la Ilustración 23, indica que los tratamientos 2, 4, 6, 8 y 9 presentan mayor variabilidad.

### 5.2.2. Módulo elástico por deformación

Puesto que el valor-P de la razón-F, como se muestra en la tabla 37, es mayor que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media del módulo elástico entre un nivel de un tratamiento y otro, con un nivel del 95.0% de confianza.

Tabla 37. Resumen análisis ANOVA para módulo elástico.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	2.88E+08	8	3.61E+07	0.25	0.9738
Intra grupos	2.58E+09	18	1.43E+08		
Total (Corr.)	2.87E+09	26			

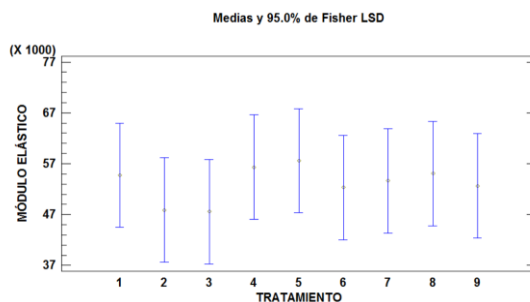


Ilustración 24. Gráfico de medias con bordes para módulo elástico.

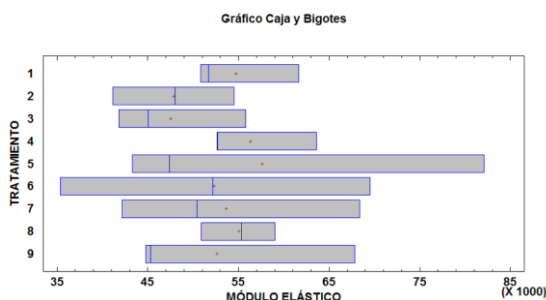


Ilustración 25. Gráfico de caja y bigotes para módulo elástico.

En gráfico de medias se puede ver el traslape de todos los tratamientos en algún punto, es decir, las medias no son independientes de los rangos de los tratamientos. En el gráfico de caja se puede observar la alta variabilidad que existe en todos los tratamientos, a excepción del tratamiento 8.

No se realizó análisis ANOVA simple ni multifactorial para los módulos elásticos resultantes de la ecuación del ACI, ni de los calculados por la velocidad de propagación de onda de ultrasonido, ya que son linealmente dependientes de propiedades ya analizadas, como son la resistencia a compresión y la velocidad de propagación de onda respectivamente.

### 5.2.3. Módulo de ruptura

Puesto que el valor-P de la razón-F, como se muestra en la tabla 38, es mayor que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media del módulo de ruptura entre un nivel de un tratamiento y otro, con un nivel del 95.0% de confianza.

Tabla 38. Resumen análisis ANOVA para módulo de ruptura.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	147.029	8	18.379	1.73	0.158
Intra grupos	190.758	18	10.598		
Total (Corr.)	337.786	26			



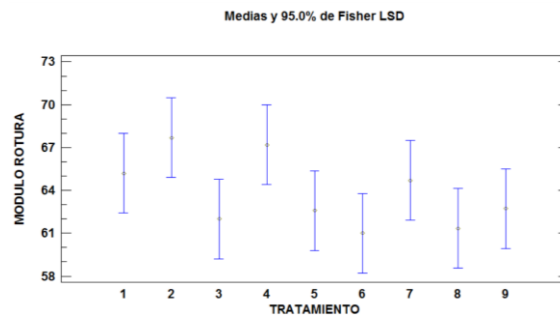


Ilustración 26. Gráfico de medias con bordes para módulo de ruptura.

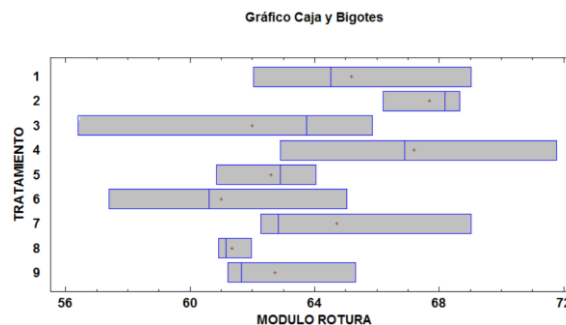


Ilustración 27. Gráfico de caja y bigotes para módulo de ruptura.

En la ilustración 26 se puede ver el traslape de la mayoría de los tratamientos en algún punto, es decir, las medias no son independientes de los rangos de los tratamientos. En la ilustración 27 se puede observar la alta variabilidad que existe en todos los tratamientos, a excepción del tratamiento 2 y 8.

#### 5.2.4. Resistencia a compresión

Puesto que el valor-P de la razón-F, como se muestra en la tabla 39, es mayor que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de la resistencia a compresión entre un nivel de un tratamiento y otro, con un nivel del 95.0% de confianza.

Tabla 39. Resumen análisis ANOVA para resistencia a compresión.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	9499.06	8	1187.380	0.89	0.5467
Intra grupos	24115.2	18	1339.740		
Total (Corr.)	33614.3	26			

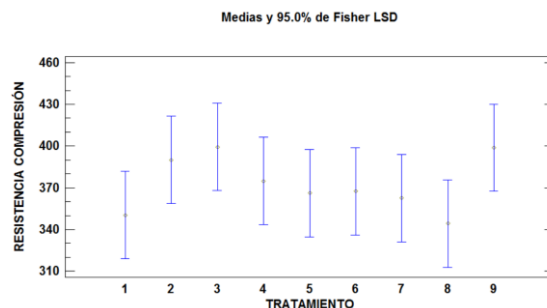


Ilustración 28. Gráfico de medias con bordes para resistencia a compresión.

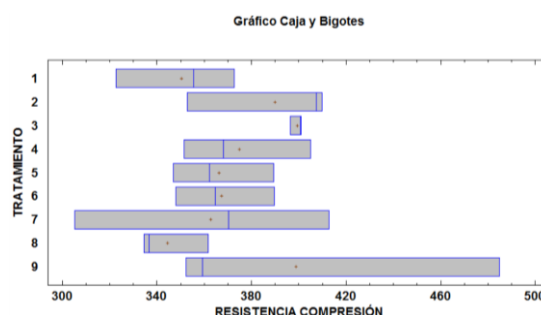


Ilustración 29. Gráfico de caja y bigotes para resistencia a compresión.

En la ilustración 28 se puede ver el traslape de todos los tratamientos en algún punto, es decir, las medias no son independientes de los rangos de los tratamientos. En la ilustración 29 se puede observar la alta variabilidad que existe en todos los tratamientos, especialmente en el tratamiento 9.

### 5.2.5. Velocidad de Onda

Puesto que el valor-P de la razón-F, como se muestra en la tabla 40, es mayor o igual que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de la velocidad de onda entre un nivel de un tratamiento y otro, con un nivel del 95.0% de confianza.

Tabla 40. Resumen análisis ANOVA para velocidad de onda.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	46051.9	8	5756.480	0.59	0.7741
Intra grupos	175800	18	9766.670		
Total (Corr.)	221852	26			

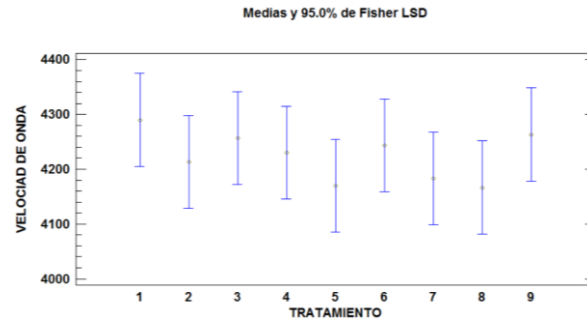


Ilustración 30. Gráfico de medias con bordes para velocidad de onda.

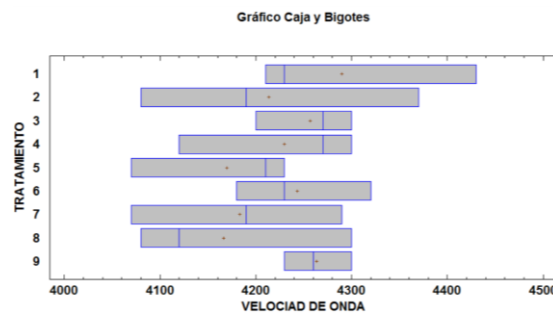


Ilustración 31. Gráfico de caja y bigotes para velocidad de onda.

En la ilustración 30 se puede ver el traslape de todos los tratamientos en algún punto, es decir, las medias no son independientes de los rangos de los tratamientos. En la ilustración 31 se puede observar la alta variabilidad que existe en todos los tratamientos, a excepción del tratamiento 9.

### 5.3. ANOVA multifactorial

El análisis ANOVA multifactorial es similar al método ANOVA simple, descrito anteriormente, con la diferencia que el primero se realiza a variables de respuestas influenciadas por varios factores con diferentes niveles. Al cambio que experimenta una variable respuesta debido al cambio de nivel de un factor se lo conoce como efectos principales. El modelo de análisis de varianza multifactorial utiliza efectos principales y de interacción como resultados a evaluar. Existe un efecto de interacción cuando el efecto de un factor sobre una variable no es el mismo en todos los niveles del siguiente factor (Pardo, Garrido, Ángel, & San, 2007).

A continuación, se presenta la ecuación de análisis mediante ANOVA multifactorial.

Para cada observación  $Y_{ijk}$  suponemos:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk} \quad (37)$$

Donde  $\alpha_i$ ,  $\beta_j$  tienen el mismo sentido que en el modelo anterior,  $(\alpha\beta)_{ij}$  es el efecto de interacción entre F1 en nivel i, y F2 en nivel j, y  $\epsilon_{ijk}$  es el residuo, 2 que entendemos debido al azar. Los contrastes sobre la significatividad de F1 y de F2

son análogos al modelo anterior. Además, se debe comprobar si existe interacción entre los factores, lo cual supone contrastar la siguiente hipótesis:

$$H_0 : (\alpha\beta)_{ij} = 0 \quad \text{Para todo } i, j$$

$$H_1 : \text{algún } (\alpha\beta)_{ij} \neq 0$$

$\alpha_i$ ,  $\beta_j$  se estiman como en el modelo anterior. Sin embargo, si escribimos la media de los datos con F1 en nivel i y F2 en nivel j como  $\mu_{ij}$ , entonces  $(\alpha\beta)_{ij}$  se estima como

$$(\alpha\beta)_{ij} = \mu_{ij} - \mu_i - \mu_j + \mu \quad (38)$$

Los requisitos del modelo son análogos a los del caso anterior. Conviene observar, sin embargo, que los residuos son diferentes en el caso de considerar modelos con o sin interacción.

A continuación, se presenta los análisis ANOVA multifactorial realizados a las variables de respuesta antes mencionadas, influenciados por los dos factores de interacción, siendo estos: Factor A las fibras comerciales, y el factor B las fibras recicladas.

### 5.3.1. Análisis de Varianza para Resistencia a Compresión Simple

Puesto que ningún valor-P, como muestra la Tabla 41, es menor que 0.05, ninguno de los factores o interacciones tiene un efecto estadísticamente significativo sobre Resistencia a compresión con un 95.0% de nivel de confianza.

Tabla 41. ANOVA multifactorial para resistencia a compresión.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
A:Fibras Comerciales	2799.4	2	1399.7	1.04	0.3722
B:Fibras Recicladas	709.51	2	354.75	0.26	0.7703
INTERACCIONES					
AB	5990.14	4	1497.53	1.12	0.3789
RESIDUOS	24115.2	18	1339.74		
TOTAL (CORREGIDO)	33614.3	26			

### 5.3.2. Análisis de Varianza para Módulo Elasticidad

Puesto que ningún valor-P, como muestra la Tabla 42, es menor que 0.05, ninguno de los factores o interacciones tiene un efecto estadísticamente significativo sobre Módulo Elasticidad con un 95.0% de nivel de confianza.

Tabla 42. ANOVA multifactorial para módulo de elasticidad.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
A:Fibras Comerciales	3.44E9	2	1.72E9	0.47	0.6352
B:Fibras Recicladas	3.31E9	2	1.66E9	0.45	0.6461
INTERACCIONES					
AB	6.97E8	4	1.74E8	0.05	0.9954
RESIDUOS	6.66E10	18	3.70E9		
TOTAL (CORREGIDO)	7.41E10	26			

### 5.3.3. Análisis de Varianza para Relación Poisson

Puesto que ningún valor-P, como muestra la Tabla 43, es menor que 0.05, ninguno de los factores o interacciones tiene un efecto estadísticamente significativo sobre Relación Poisson con un 95.0% de nivel de confianza.

Tabla 43. ANOVA multifactorial para relación de Poisson.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
A:Fibras Comerciales	0.00058	2	0.000292	0.66	0.5297
B:Fibras Recicladas	0.00054	2	0.000270	0.61	0.5551
INTERACCIONES					
AB	0.00165	4	0.000414	0.93	0.4668
RESIDUOS	0.008	18	0.000444		
TOTAL (CORREGIDO)	0.01078	26			

### 5.3.4. Análisis de Varianza para Asentamiento $T_{50}$

Puesto que un valor-P del efecto principal A (fibras comerciales) es menor que 0.05, como muestra la Tabla 44, este factor tiene un efecto estadísticamente significativo sobre asentamiento  $T_{50}$  con un 95.0% de nivel de confianza.

Tabla 44. ANOVA multifactorial para asentamiento  $T_{50}$ .

Fuente	Suma de	Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES						
A:Fibras Comerciales	743.383		2	371.692	17.08	0.0001
B:Fibras Recicladas	98.825		2	49.412	2.27	0.1320
INTERACCIONES						
AB	44.919		4	11.229	0.52	0.7250
RESIDUOS	391.747		18	21.763		
TOTAL (CORREGIDO)	1278.88		26			

Medias y 95.0% de Fisher LSD

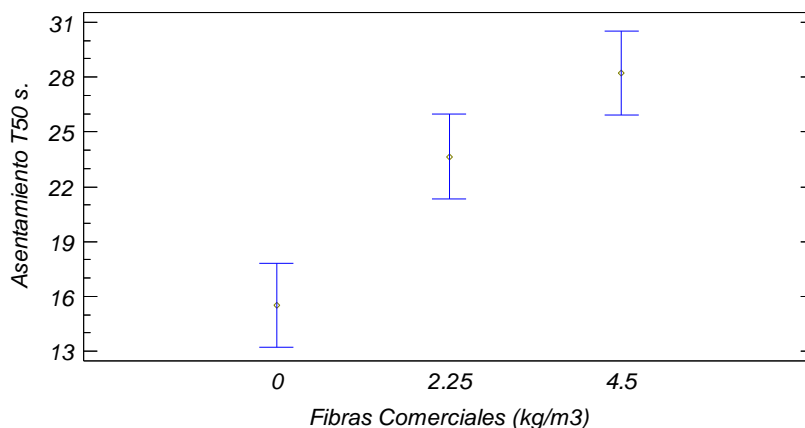


Ilustración 32. Gráfico de medias para asentamiento  $T_{50}$ .

A través del gráfico de medias, representado en la ilustración 32, se interpreta que, con el aumento en peso por metro cúbico de concreto de fibras comerciales, el tiempo  $T_{50}$  incrementa. Además, se observa claramente que entre las medias del factor existe diferencias significativas, es decir, existe independencia del primer tratamiento con el tercer tratamiento. Los valores de  $T_{50}$  en el efecto principal del factor fibras recicladas no presentan diferencias significativas, así como en el efecto de interacción.

### 5.3.5. Análisis de Varianza para Módulo de Ruptura

Puesto que ningún valor-P es menor que 0.05, ninguno de los factores o interacciones tiene un efecto estadísticamente significativo sobre el módulo de ruptura con un 95.0% de nivel de confianza.

Tabla 45. ANOVA multifactorial para módulo de ruptura.

Fuente	Suma de Cuadrados	de Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
A:Fibras Comerciales	25.909	2	12.954	1.25	0.3096
B:Fibras Recicladas	28.038	2	14.019	1.36	0.2829
INTERACCIONES					
AB	88.427	4	22.107	2.14	0.1180
RESIDUOS	186.185	18	10.343		
TOTAL (CORREGIDO)	328.561	26			

### 5.4. Gráficos de superficie de respuesta

Un diseño de superficie de respuesta es un conjunto de técnicas avanzadas de diseño de experimentos, que ayudan a entender mejor y optimizar la respuesta. Una vez determinado los factores importantes utilizando el diseño factorial, la metodología de una superficie de respuesta se aplica para afinar y representar los modelos, especialmente si se sospecha que existe curvatura en dicha superficie.

Los datos experimentales se ajustan a una expresión matemática, que represente el fenómeno estudiado, mediante un modelo estadístico, en el que se basa el análisis del diseño de superficie de respuesta. El modelo estadístico expresa la variable respuesta  $Y$  como una función lineal de los factores experimentales, interacciones entre los factores, términos cuadráticos y término del error.

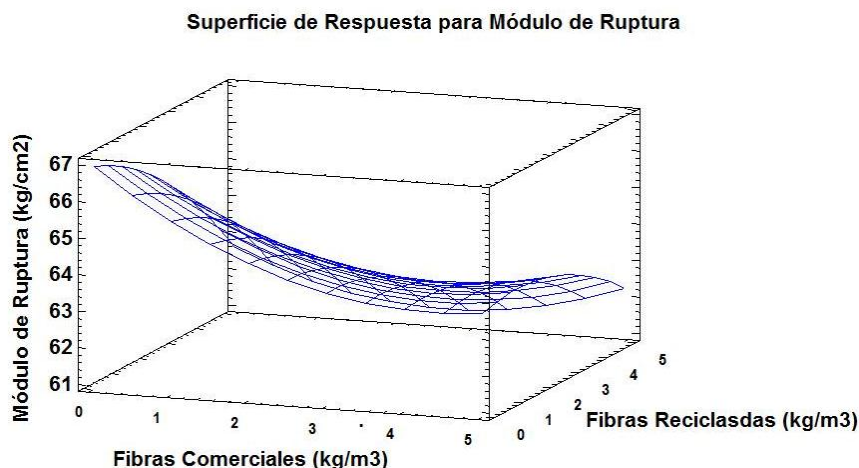
$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2 + \varepsilon \quad (39)$$

A continuación, se presenta las gráficas de superficie de respuesta y sus respectivas graficas de contornos de las variables respuesta estudiadas, de los cuales se puede conocer el valor de la variable respuesta en cualquier combinación de niveles de factores, dentro de la región experimental.



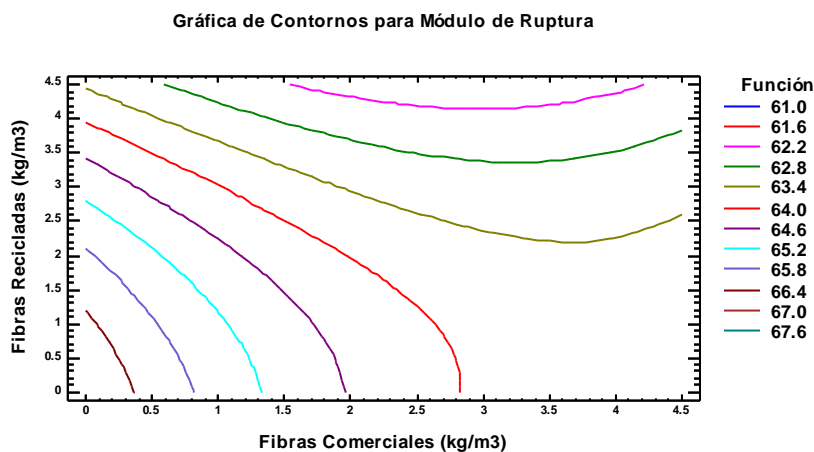
### 5.4.1. Módulo de Ruptura

En la superficie de respuesta, representada por la Ilustración 33, se puede observar que el módulo de ruptura es menor en concretos que contengan mayor cantidad de fibras. La gráfica de contorno, mostrada en la Ilustración 34, es la proyección horizontal de la superficie de respuesta. La zona óptima, en la que la variable respuesta de módulo de ruptura sea máximo, se encuentra fuera de la región experimental.



*Ilustración 33. Superficie de respuesta para módulo de ruptura*

$$f(x,y) = 66.929 - 1.53 * x - 0.308025 * y + 0.174376 * x^2 + 0.116708 * x * y - 0.109081 * y^2$$



*Ilustración 34. Gráfico de contornos para módulo de ruptura.*

$$R^2 = 32.55, R^2_{ajustada\ por\ gl} = 7.70$$

### 5.4.2. Asentamiento $T_{50}$

En la superficie de respuesta, representada por la Ilustración 35, se puede observar que, con el aumento de la cantidad de fibras recicladas y comerciales en la mezcla de concreto, el asentamiento  $T_{50}$  aumenta. La gráfica de contorno, mostrada en la Ilustración 36, es la proyección horizontal de la superficie de respuesta. La zona óptima, en la que la variable respuesta de asentamiento es

mínima, se encuentra fuera de la región experimental. Según la forma de la superficie de respuesta, se puede deducir que un aumento en el contenido de fibras, superior a 4.5 kg de fibras por metro cubico, producirá el asentamiento máximo, y posteriormente el concreto perderá trabajabilidad por el gran contenido de fibras, reduciendo el tiempo  $T_{50}$  del asentamiento. De igual manera, se observa que, en la región experimental analizada, el CAC base sin inclusión de fibras presenta el menor tiempo  $T_{50}$ , lo cual se busca en un concreto autocompactante.

Superficie de Respueta para Asentamiento T50

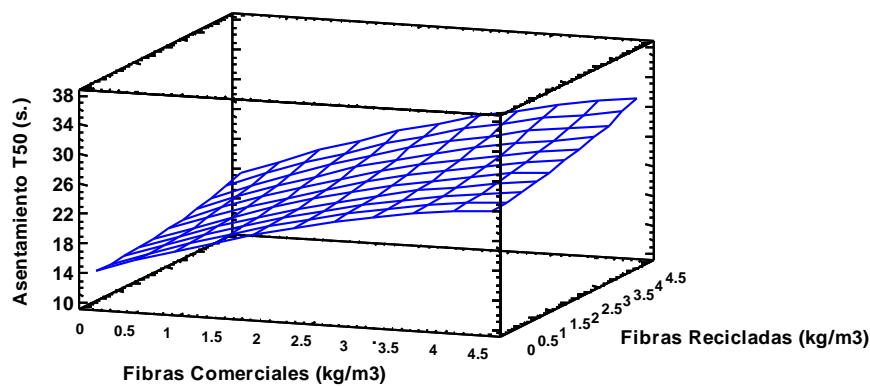


Ilustración 35. Superficie de respuesta para asentamiento  $T_{50}$ .

$$f(x,y) = 13.9856 + 4.19136 * x + 0.0491358 * y - 0.351276 * x^2 + 0.0928395 * x * y + 0.168889 * y^2$$

Grafica de Contornos para Asentamiento T50

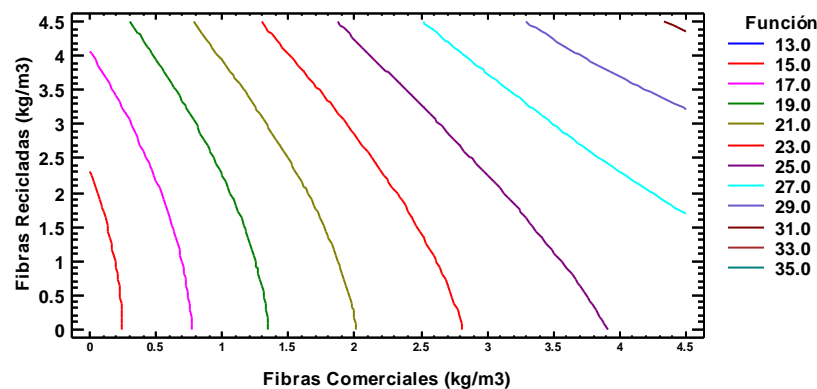


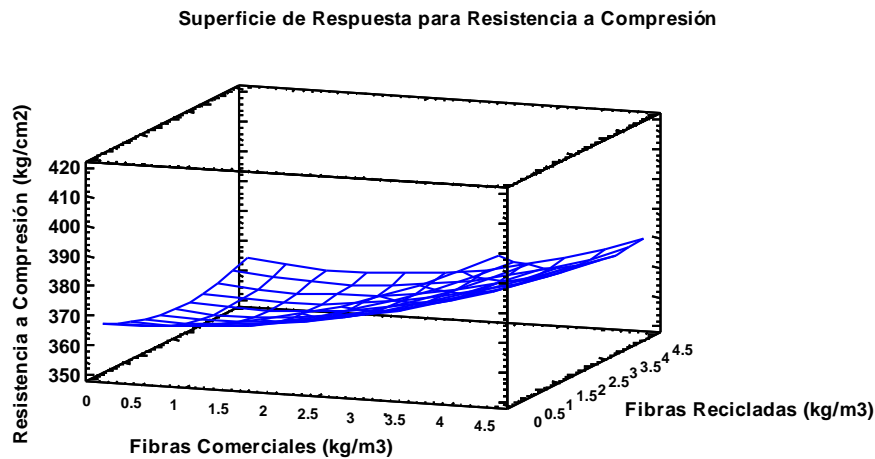
Ilustración 36. Gráfica de contornos para asentamiento  $T_{50}$ .

$$R^2 = 67.97, R^2_{ajustada por gl} = 56.16$$

### 5.4.3. Resistencia a compresión

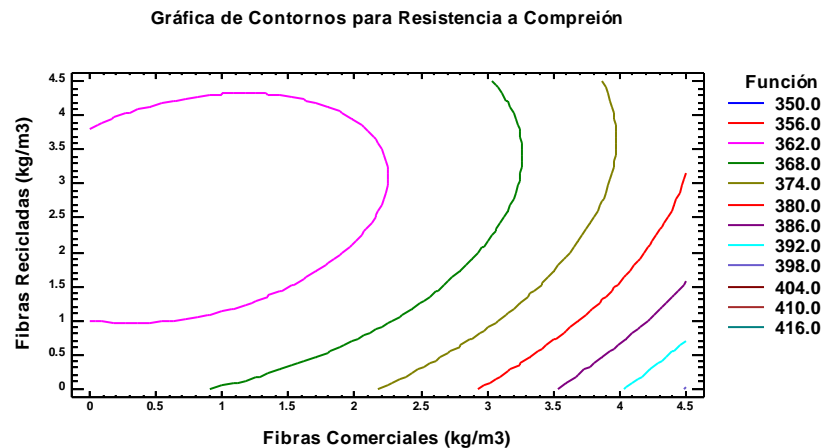
En la superficie de respuesta, representada por la Ilustración 37, se puede observar que, con el aumento de la cantidad de fibras recicladas y comerciales en la mezcla de concreto, la resistencia a compresión del concreto a los 28 días de edad aumenta ligeramente. La zona óptima, en la que la variable respuesta de la resistencia a compresión es máxima, se encuentra fuera de la región

experimental. La gráfica de contorno, mostrada en la Ilustración 38, muestra claramente que el punto donde la resistencia a compresión es menor se encuentra dentro de la región experimental. Según la forma de la superficie de respuesta, y el grafico de contornos, se deduce que la mezcla de CAC que tiene la menor resistencia a compresión es la que incluye aproximadamente 0.8 kg de fibras comerciales y 2.5 kg de fibras recicladas por metro cúbico de concreto.



*Ilustración 37. Superficie de Respuesta para resistencia a compresión.*

$$f(x,y) = 366.901 - 0.219012 * x - 6.18469 * y + 1.59693 * x^2 - 0.812181 * x * y + 1.28318 * y^2$$



*Ilustración 38. Gráfica de contornos para resistencia a compresión.*

$$R^2 = 15.07 \text{ , } R^2_{ajustada \text{ por } gl} = 0.00$$

#### 5.4.4. Módulo de elasticidad

En la superficie de respuesta, representada por la Ilustración 39, se puede observar que, con el aumento de la cantidad de fibras recicladas en la mezcla de concreto, el módulo de elasticidad del mismo aumenta ligeramente, lo que quiere

decir que el concreto presenta menor deformación, tendiendo el máximo valor en la mezcla que contiene 4.00 kg de fibra reciclada por metro cúbico. La gráfica de contorno, mostrada en la Ilustración 40, muestra claramente que lo antes mencionado. Según la forma de la superficie de respuesta, y el grafico de contornos, se deduce que la mezcla de CAC que tiene el menor módulo de elasticidad es la que incluye 4 kg de fibra comercial por metro cúbico y 0 kg de fibra reciclada.

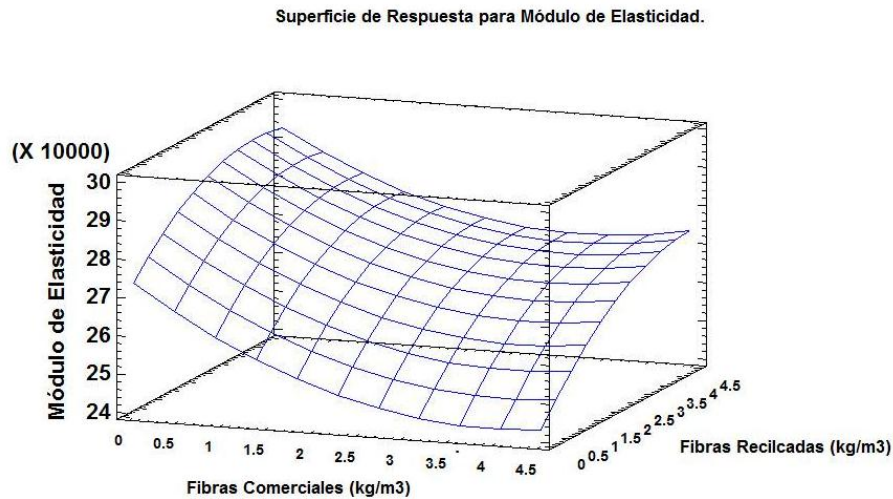


Ilustración 39. Superficie de Respuesta para Módulo de elasticidad por deformación.

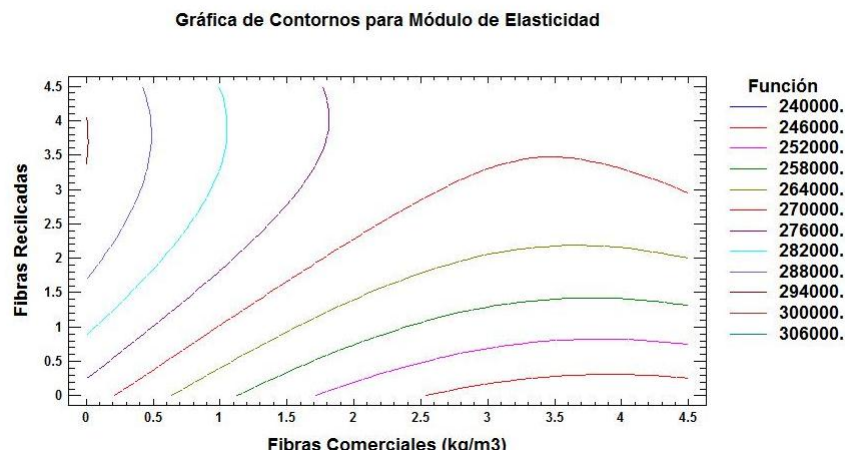


Ilustración 40. Gráfica de contornos para los Módulos de Elasticidad por deformación.

$$R^2 = 16.96, R^2_{ajustada \text{ por } gl} = 0.00$$

#### 5.4.5. Relación de Poisson

A continuación, se presenta el gráfico de superficie de respuesta, así como el gráfico de contorno de la relación de Poisson de las diferentes mezclas. Como se mencionó en el Capítulo IV, los valores obtenidos no representan el comportamiento real del concreto, por lo que su análisis es innecesario.

Superficie de Respuesta para Relación de Poisson.

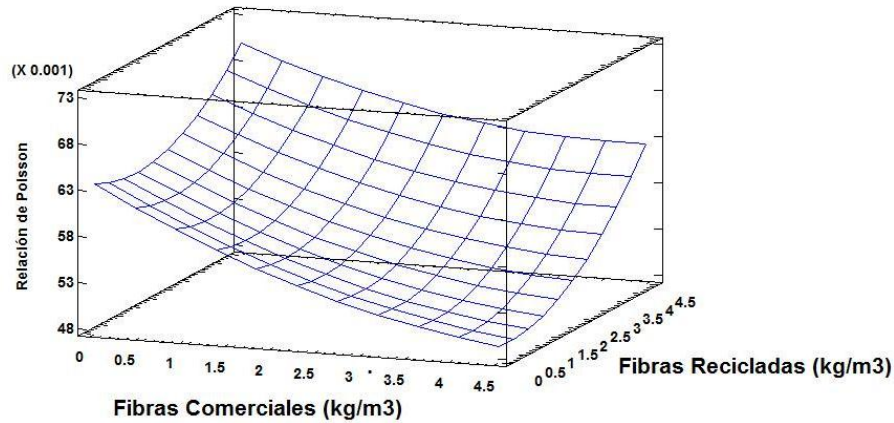


Ilustración 41. Superficie de Respuesta para Relación de Poisson.

Gráfica de Contornos para Relación de Poisson.

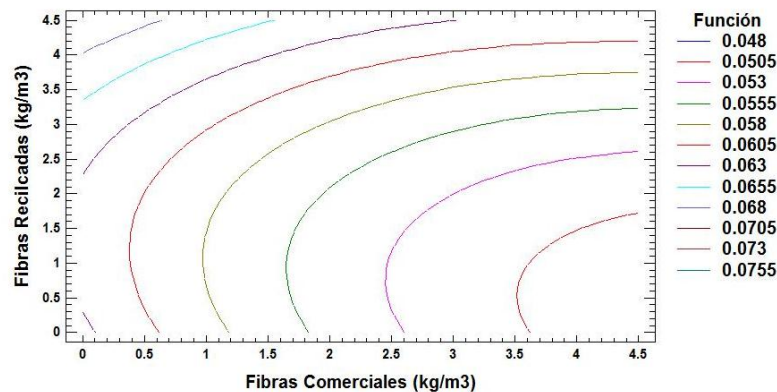


Ilustración 42. Gráfica de contornos para Relación de Poisson.

$$R^2 = 17.62, R^2_{ajustada \text{ por } gl} = 0.00$$

## 5.5. Identificación del tratamiento de mejor desempeño

Se presenta a continuación en la tabla 46 un resumen de los tratamientos de mejor desempeño según cada propiedad mecánica estudiada, tomando como valor definitivo la media de los datos correspondientes a cada tratamiento.

Tabla 46. Tabla tratamiento de mejor desempeño por propiedad.

Propiedad mecánica analizada	Tratamiento de mejor desempeño (kg/m <sup>3</sup> )
Mayor Resistencia a Compresión	4.50 Fibra Comercial, 0 Fibra reciclada
Menor Módulo de elasticidad	2.25 Fibra Comercial, 2.25 Fibra Reciclada



Mayor Módulo de Ruptura

2.25 Fibra Comercial, 0 Fibra Reciclada

Menor Asentamiento  $T_{50}$

0 Fibra Comercial, 0 Fibra Reciclada

---



---

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El concreto es uno de los materiales de construcción más usados a nivel mundial, junto con el acero, por lo que está sujeto constantemente a cambios y mejoras. La investigación realizada sobre un tipo específico de concreto, como es el caso del concreto autocompactante (CAC), con la inclusión de macrofibras recicladas y comerciales, amplía el conocimiento existente sobre el comportamiento y las propiedades, físicas y mecánicas, de estos.
- A pesar de haber utilizado agregados, tanto grueso como fino, aceptados dentro del rango permitido para la fabricación de CAC, con características aceptadas en tamaño máximo nominal (TMN) y contenido de finos, la utilización de arena natural rodada de río, por su forma, mejoraría las propiedades en estado fresco del concreto. Además, el uso de otro tipo de arena, que contenga mayor cantidad de partículas finas, en reemplazo de la arena de colma fina distribuida por Sika, reduciría los costos finales del concreto, debido a los costos elevados de esta última. El empleo de aditivo superplastificante es esencial para brindar fluidez y viscosidad necesaria a un CAC, por lo que este debe ser de alto rango y de buena calidad. Durante la realización de esta investigación, 45 botellas plásticas de PET fueron recicladas. Para la confección de las mezclas de CAC estudiadas, se reciclarían de 64 a 128 botellas plásticas de PET por metro cúbico de concreto. En obras grandes, la cantidad de botellas recicladas sería significativa, pudiendo ser una alternativa de reciclaje amigable con el medio ambiente, y tendría un efecto positivo en la disminución del impacto ambiental de la construcción.
- Al emplear un diseño de experimentos en la investigación, los procesos de confeccionado y ensayos se ejecutaron de manera óptima, es decir, reduciendo recursos y tiempo, en comparación de una investigación realizada por “prueba y error”. Las variables respuesta analizadas son las que mejor caracterizan a un concreto, y son esenciales para diseños de elementos estructurales. Los niveles de cantidad de fibra escogidos para la investigación respetan los máximos recomendados por el fabricante (Sika) de las fibras comerciales, así como producen cambios significativos en las propiedades de las diferentes mezclas de CAC, tanto en estado fresco como endurecido. Es indispensable bloquear los factores controlables con el fin de minimizar la variabilidad producida por estos últimos en la variable respuesta estudiada, así como aleatorizar el orden de confección de las mezclas de CAC para equilibrar la variación en las variables respuesta.
- Debido a que la mezcla base de CAC utilizada en la investigación se modificó a partir de un diseño de concreto de alta resistencia, variando únicamente la relación A/C y la cantidad de aditivo, como se explicó en el Capítulo III, la cantidad de cemento por metro cúbico es alta, superando los 550 kg de cemento por metro cúbico de concreto. Con la implementación



de un diseño de CAC, se podría llegar a un concreto de resistencia a compresión similar a las obtenidas, pero de menor consumo de cemento, que repercutirá en el costo final del concreto y de la obra. Al introducir un procedimiento estandarizado de operación (SOP) para el mezclado del concreto, se redujo al máximo posible las variaciones en los resultados finales debidas al proceso de mezclado.

- Las propiedades mecánicas de cada tratamiento de CAC varían tanto en su estado fresco como endurecido, con respecto a la mezcla base. Según las Directrices Europeas para el hormigón autocompactante el CAC de todas las mezclas realizadas se encuentran dentro de la clasificación de SF2 de acuerdo a su asentamiento, y pertenecen a la clase VS2/VF2 por su viscosidad, como se indica en el Capítulo IV. Los tratamientos de CAC en estado fresco que contienen mayor cantidad de fibras, obtuvieron un tiempo mayor  $T_{50}$ , lo que quiere decir que su fluidez disminuyó. De igual manera, las mezclas en estado fresco con mayor cantidad de fibras presentaron dificultad de fluir, ya que se formaban aglomeraciones por la cantidad de fibras. En elementos densamente armados, la cantidad de fibras utilizadas puede presentar cierta dificultad del concreto en llenar los vacíos existentes, es decir, se puede perder ciertas características esenciales de un CAC.
- La resistencia a compresión caracteriza de manera apropiada al concreto, y al ser un parámetro fundamental para el diseño estructural, es necesario que su valor sea igual o mayor al requerido. De los ensayos a resistencia de compresión simple de las probetas cilíndricas, se observó un aumento de hasta un 15% con respecto al concreto base sin fibras, sin embargo, se obtuvo en un único tratamiento (2.25 kg Fibra Normalizada – 4.50 kg Fibra Reciclada) resistencia menor en 2% al concreto base. La mezcla que mayor resistencia alcanzó fue la conformada por 4.5 kg de fibra comercial por metro cúbico, siendo esta 399.32 kg/cm<sup>2</sup>.
- Del ensayo de módulo de ruptura en las probetas prismáticas tipo viguetas, se observó que solo dos mezclas superaron el valor del módulo de ruptura de la mezcla base (65.99 kg/cm<sup>2</sup>). Estas mezclas, la primera conformada por 2.25 kg de fibra comercial por metro cúbico de concreto, y la segunda conformada por 2.25 kg de fibra reciclada por metro cúbico de concreto, alcanzaron 67 kg/cm<sup>2</sup>. El menor valor de módulo de ruptura pertenece a la mezcla conformada por 2.25 kg de fibra comercial y 2.25 kg de fibra reciclada por metro cúbico, siendo igual a 61 kg/cm<sup>2</sup>. La diferencia más notoria se dio en el tipo de falla de las mezclas de CAC. Mientras que las viguetas de la mezcla base se partían en dos partes separadas, las viguetas con inclusión de fibras permanecían en un solo bloque, a pesar de que la grieta era profunda y perimetral. Las fibras “cosían” las grietas, y no permitían que la vigueta se rompa en dos elementos, como se muestra en la ilustración 19 en el Capítulo IV. Existe buena adherencia entre las fibras comerciales y el concreto endurecido, ya que estas presentan forma dentada, las cuales generan trabazón mecánica. A diferencia de lo que se podría creer, las fibras recicladas presentaban de igual manera buena

adherencia mecánica en el concreto endurecido, a pesar de que estas presentan superficies lisas y regulares.

- Los ensayos de módulo de elasticidad en las probetas cilíndricas realizados en el laboratorio de la Universidad de Cuenca no presentaron resultados confiables, ya que estos no predicen de manera correcta el comportamiento de un concreto, como se explicó en el Capítulo IV. Los valores obtenidos se encontraban muy por debajo de los esperados. Esta variación en los resultados puede deberse a que la prensa hidráulica utilizada no consta con medidores precisos de la velocidad de aplicación de carga. De igual manera, el equipo utilizado consta de un solo deformímetro vertical, lo que quiere decir que, en caso de existir una probeta cilíndrica que presente una superficie de contacto no nivelada o no completamente horizontal, la lectura del deformímetro no será la deformación vertical real. La prensa hidráulica utilizada se encontraba calibrada, pero no certificada, factor que puede ser influyente en los resultados finales. El laboratorio de la Universidad de Cuenca dispone de un compresómetro para determinar el módulo de elasticidad y relación de Poisson en probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro por 30 cm de alto, al cual se adaptó para probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro por 20 cm de alto, reemplazando ciertas piezas y manteniendo su relación. Esta adaptación pudo haber generado variaciones en los módulos de elasticidad. Además, se cuenta con errores por deformaciones de la prensa hidráulica, de esta manera se generan mayores deformaciones provocando que los valores de los módulos elásticos calculados disminuyan. Los resultados de los módulos de elasticidad de los CAC base sin inclusión de fibras obtenidos en el laboratorio Labscon, se asemejan a los determinados por la ecuación del ACI, así como los calculados por la velocidad de propagación de onda de ultrasonido, como se indica en el Capítulo IV. En busca de la obtención de valores que representen bien el concreto el factor de corrección determinado se multiplicó a los valores obtenidos en el laboratorio de la Universidad de Cuenca. El menor módulo de elasticidad es de 238785 kg/cm<sup>2</sup>, correspondiente a la mezcla conformada por 2.25 kg/m<sup>3</sup> de fibra comercial y 2.25 kg/m<sup>3</sup> de fibra reciclada.
- El extensómetro utilizado y disponible en el laboratorio de la Universidad de Cuenca, que permite conocer las deformaciones transversales en una probeta cilíndrica de concreto, no es preciso ni actualizado, por lo que los resultados obtenidos de la relación de Poisson no pueden ser considerados como confiables ni reales. De igual manera el deformímetro utilizado no funcionaba de manera adecuada. Debido a que en los laboratorios de materiales en la ciudad de Cuenca no realizan ensayos de relación de Poisson a concretos, los valores obtenidos no se pudieron comprobar.
- La variación en la densidad entre los CAC con inclusión de fibras y el CAC base no es significativa, siendo esta  $\pm 1\%$ . La densidad promedio de los CAC confeccionados es de 2250 kg/m<sup>3</sup>. Este valor de densidad es semejante al de un concreto convencional. La velocidad de propagación de

onda en los CAC, determinó que los concretos confeccionados son de buena calidad, y no presentan cavidades ni oquedades internas.

- Al analizar las medias de cada tratamiento para cada variable respuesta, mediante un análisis de varianza ANOVA simple, se encontró que no existe variación estadísticamente significativa entre la media de los tratamientos para cada variable respuesta estudiada, a excepción del asentamiento. Como se explicó anteriormente, el tiempo  $T_{50}$  está en función de la cantidad de fibras que contenga la mezcla, aumentando significativamente con el incremento de cantidad de fibras.
- El análisis de varianza ANOVA multifactorial demostró que no existe variación estadísticamente significativa en las variables respuesta influenciadas por las fibras adicionadas (comerciales y recicladas), y los diferentes niveles (cantidad de fibras en kg por metro cúbico), exceptuando, nuevamente, la variable de respuesta de asentamiento  $T_{50}$  por el efecto principal del factor de fibras comerciales. La adición de fibras comerciales provoca cierta pérdida de fluidez en la mezcla en estado fresco.
- Los fenómenos estudiados se representaron a través de superficies de respuesta, que permiten ajustar los datos experimentales en expresiones matemáticas. Dentro de estas superficies se espera encontrar en punto de mejor desempeño del CAC de acuerdo a cada variable respuesta, sin embargo, en todas las variables respuesta estudiadas, este punto se encuentra fuera de la región experimental. De la superficie de respuesta de la variable de resistencia a compresión simple, se puede obtener el tratamiento de resistencia mínima dentro y fuera de la región experimental, siendo esta característica no deseada. Dentro de esta misma variable respuesta, se podría extender la región experimental, aumentando la cantidad de fibras, tanto recicladas como comerciales, esperando encontrar el punto donde la resistencia a compresión es la máxima, conociendo que, al aumentar la cantidad de fibras, el concreto perderá propiedades importantes de autocompactabilidad.

En países en vía de desarrollo, como es Ecuador, la construcción está íntimamente ligada con su progreso, por lo que el concreto es un material que seguirá siendo usado por muchos años más. El uso de materiales alternativos y menos agresivos con el medio ambiente en concretos es una necesidad latente. El estudio de concretos con inclusión de materiales reciclados está en su etapa inicial, por lo que esta investigación permite conocer y analizar ciertas propiedades mecánicas y físicas, así como su comportamiento. Con esta investigación se encontró, que el uso de fibras plásticas recicladas de PET en CAC, otorga características y propiedades similares a la de CAC con la inclusión de fibras comerciales. En un futuro se podría esperar que el uso de fibras comerciales sea reemplazado por fibras recicladas, debido a la similitud en su desempeño en concretos.



Esta investigación no contempla estudios de durabilidad, resistencia al fuego del concreto, ni las posibles reacciones a largo plazo entre la pasta y las fibras recicladas, por lo que sería importante investigar estos parámetros.

## REFERENCIAS

- ACI. ACI 318-Requisitos del Código de Construcción para Concreto Estructural (2014).
- ACI Comité 544. (2002). State of the Art Report on Fiber Reinforced Concrete Reported (ACI 544.1R-96 Reapproved 2002). *ACI Structural Journal*, 96(Reapproved), 66. article.
- Angarita, D. (2009). Programa Interinstitucional para la Separación y Valorización de Residuos Sólidos Aprovechables en la ciudad de Tunja., 1–11. article.
- Associates, F. (2010). *FINAL REPORT 100 % POSTCONSUMER HDPE AND PET RECYCLED RESIN FROM POSTCONSUMER CONTAINERS AND PACKAGING PREPARED FOR THE PLASTICS DIVISION OF THE AMERICAN CHEMISTRY COUNCIL , INC ., THE ASSOCIATION OF POSTCONSUMER PLASTIC RECYCLERS ( APR ), THE NATIONAL AS.* Kansas.
- ASTM C 1157. Especificación Normalizada de Desempeño para Cemento Hidráulico (2011).
- ASTM C 127. Método de Ensayo Normalizado para Determinar la Densidad, la Densidad Relativa (Gravedad Específica), y la Absorción de Agregados Gruesos (2004).
- ASTM C 128. Método de Ensayo Normalizado para Determinar la Densidad, la Densidad Relativa (Gravedad Específica), y la Absorción de Agregados Finos (2004).
- ASTM C 136. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates (2014).
- ASTM C 1602. Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete (2012).
- ASTM C 31. Práctica Normalizada para Preparación y Curado de Especímenes de Ensayo de Concreto en la Obra (2010).
- ASTM C 33. Especificación Normalizada para Agregados para Concreto (2016).
- ASTM C 39. Método de Ensayo Normalizado para Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto (2016).
- ASTM C 469. Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression (2014).
- ASTM C 597. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete (2016).



- ASTM C 617. Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens (2015).
- ASTM C 78. Método de Ensayo Normalizado para la Determinación de la Resistencia a la Flexión del Concreto (Utilizando Viga Simple con Carga en los Tercios del Claro) (2002).
- ASTM D 2487. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System) (2011).
- ASTM D 75. Práctica Normativa para el Muestreo de Agregados (2003).
- Aymar, G. (2007). Verificación de la dosificación de fibras sintéticas para neutralizar las fisuras causadas por contracción plástica en el concreto.
- Bentur, Arnon; Mindess, S. (2007). Cementitious Composites. In Francis & Taylor (Eds.), *Civil Engineering* (2nd ed., p. 625). incollection, Modern Concrete Technology Series.
- Bentur, A. of C. E., University of British Columbia, C., Mindess, S. of C. E., & University of British Columbia, C. (2007). *Cementitious Composites*. (Taylor & Francis, Eds.) (Second edi).
- Burón, M., Jaime, F., & Garrido, L. (2006). H Ormig{ó}n. misc, Instituto Espa{ñ}ol del cemento y sus Aplicaciones.
- Cañizares, I. (2012). *DISEÑO DE MEZCLAS DE HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE UTILIZANDO MATERIALES DE LA ZONA*. UNIVERSIDAD DE CUENCA.
- Carrasco, F. (n.d.). No Title. In *Tecnología del hormig{ó}n - Ingeniería Civil* (p. 1). incollection, Universidad Tecnológica Nacional- Facultad Regional Santa Fe.
- Carrasco, M. F. (Univeridad T. N. (1997). Facultad Regional Santa Fe. In *ROCAS Y AGREGADOS PARA HORMIGONES* (pp. 1–25). Santa Fe.
- Cossolino, L. C., Pereira, A. H. A., & Debs, M. K. E. L. (2011). Determination of modulus of elasticity of concrete from the acoustic response Determinação do módulo de elasticidade do concreto a partir da resposta acústica, 4(5), 792–802.
- Dorbessan, J. R. (2006). *Las 5S, herramientas de cambio*. (E. U. de la U.T.N., Ed.). book, Editorial Universitaria de la U.T.N.
- EFNARC. (2002). Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. misc, UK: EFNARC.
- Fernández, J., & Burón, M. (2005). *Guía práctica para la utilización del hormigón autocompactante*.
- Fernández Cánovas, M. (2013). *HORMIGÓN*. (Garceta, Ed.) (10th ed.). Madrid.





- GPE. (2006). *Directrices Europeas para el Hormigón Autocompactante*. Retrieved from <http://anfah.org/wp-content/uploads/pdf/articulo-tecnico-directrices-hac-febrero-2006-revision-1.pdf>
- Gutiérrez Pulido, H., & De la Vara Salazar, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. (I. McGraw-Hill, Ed.) (2nd ed., Vol. 1). book, McGraw-Hill, Interamericana. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Kosmatka, S., & Kerkoff, B. (2004). *Diseño y Control de Mezcla de Concreto*. (PCA, Ed.) (EB201). book.
- Lanka, S. R. I. (2012). Influence of Fine Aggregate Types on the Performance Self Flowing Concrete, *V*(2002), 251–258. article.
- Mamlouk, M., & Zaniewski, J. (2009). *Materiales Para Ingenieria Civil.Pdf* (2nd ed.). book, Madrid: Pearson.
- Montgomery, D. (2011). *DISEÑO Y ANÁLISIS DE EXPERIMENTOS*. (L. WILEY, Ed.) (segunda).
- Mora Abril, D. B. (2014). *Universidad de cuenca*. Universidad de Cuenca.
- NAPCOR. (2010). *Lo Básico del PET*. Retrieved from [http://www.napcor.com/pdf/NAPCOR\\_PETBasics\\_spanish.pdf](http://www.napcor.com/pdf/NAPCOR_PETBasics_spanish.pdf)
- Pardo, A., Garrido, J., Ángel, M., & San, R. (2007). La interacción entre factores en el análisis de varianza : errores de interpretación, *19*(1), 343–349.
- Qian, C. X., & Stroeve, P. (2000). Development of hybrid polypropylene-steel fibre-reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, *30*(1), 63–69. article. [http://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00202-1](http://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00202-1)
- Romo Proaño, M. (2008). *CAPÍTULO II. Temas de hormigón armado*. Quito: ESPE.
- Sideris, K. K., Manita, P., & Sideris, K. (2004). Estimation of ultimate modulus of elasticity and Poisson ratio of normal concrete, *26*, 623–631. [http://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00084-2](http://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00084-2)
- Sika. (2010). *Concreto Reforzado con Fibras*. misc. Retrieved from [www.sika.com.co](http://www.sika.com.co)
- Sika. (2015). *Manual de Productos*. Manual. Retrieved from [http://www.coval.com.co/pdfs/manuales/man\\_sika.pdf](http://www.coval.com.co/pdfs/manuales/man_sika.pdf)
- Sivakumar, A., & Santhanam, M. (2007). Mechanical properties of high strength concrete reinforced with metallic and non-metallic fibres. *Cement and Concrete Composites*, *29*(8), 603–608. article. <http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.03.006>



## ANEXOS

### Anexo 1: Resultados Resistencia a compresión

<b>Proyecto:</b>	Tesis Universidad de Cuenca
<b>Solicitado por:</b>	José Abad, Jorge Romero
<b>Descripción de la probeta:</b>	Cilindros (10cm diámetro x 20cm alto)
<b>Fecha:</b>	15/9/2016
<b>Edad de Rotura:</b>	28

#### Resistencia a Compresión Simple

Tratamiento	Réplica	Peso	Alto	Diámetro	Carga Max.	Área	f'c
(#)	(#)	(kg)	(mm)	(mm)	(kgf)	(cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )
1	1	3.798	198.40	101.80	29225	81.39	359.06
1	2	3.767	199.55	101.00	30972	80.12	386.58
2	1	3.840	200.65	101.10	27298	80.28	340.05
2	2	3.806	199.80	101.10	28413	80.28	353.94
3	1	3.846	200.10	100.60	31814	79.49	400.25
3	2	3.834	199.90	101.90	33811	81.55	414.59
4	1	3.756	200.30	101.80	21000	81.39	258.01
4	2	3.758	199.00	101.50	28511	80.91	352.36
5	1	3.781	201.25	101.70	30140	81.23	371.03
5	2	3.786	201.00	100.55	34201	79.41	430.71
6	1	3.762	197.90	100.65	33021	79.56	415.02
6	2	3.794	199.95	102.00	32281	81.71	395.05
7	1	3.858	200.90	101.00	40199	80.12	501.74
7	2	3.885	200.10	101.25	37655	80.52	467.67
8	1	3.817	200.25	101.60	30542	81.07	376.72
8	2	3.767	199.10	100.95	35445	80.04	442.85
9	1	3.800	199.90	101.25	28949	80.52	359.55
9	2	3.804	199.55	100.80	29052	79.80	364.05
10	1	3.758	197.50	100.80	28967	79.80	362.99
10	2	3.804	198.60	101.40	26876	80.75	332.81
11	1	3.809	200.40	101.60	32404	81.07	399.69
11	2	3.849	200.60	102.00	34776	81.71	425.59
12	1	3.872	200.80	101.80	32121	81.39	394.64
12	2	3.853	200.70	101.30	32094	80.60	398.21
13	1	3.833	201.10	101.30	26170	80.60	324.71
13	2	3.822	199.90	101.80	28396	81.39	348.88
14	1	3.742	201.60	101.50	19760	80.91	244.21
14	2	3.831	201.90	101.10	32196	80.28	401.06
15	1	3.856	200.70	101.20	33760	80.44	419.71
15	2	3.856	201.10	100.50	30272	79.33	381.61
16	1	3.848	200.00	101.00	30656	80.12	382.63



16	2	3.867	200.00	102.00	32383	81.71	396.30
17	1	3.843	199.80	101.20	29090	80.44	361.65
17	2	3.842	200.70	102.00	28036	81.71	343.10
18	1	3.859	200.50	101.40	29568	80.75	366.15
18	2	3.843	200.50	100.70	28933	79.64	363.28
19	1	3.873	210.75	100.90	32870	79.96	411.08
19	2	3.851	200.35	101.60	29874	81.07	368.48
20	1	3.837	200.25	101.35	31546	80.67	391.03
20	2	3.835	200.50	100.55	26482	79.41	333.50
21	1	3.848	201.40	101.15	29947	80.36	372.68
21	2	3.811	200.50	101.25	29619	80.52	367.87
22	1	3.848	200.20	101.35	28616	80.67	354.71
22	2	3.829	200.00	101.45	28372	80.83	350.99
23	1	3.800	199.80	101.85	30104	81.47	369.50
23	2	3.795	198.15	100.80	29280	79.80	366.91
24	1	3.835	201.00	101.70	28870	81.23	355.40
24	2	3.839	200.00	101.90	29684	81.55	363.99
25	1	3.817	200.00	100.90	25575	79.96	319.85
25	2	3.808	199.95	101.00	27988	80.12	349.33
26	1	3.831	200.00	101.45	26460	80.83	327.34
26	2	3.845	199.65	100.50	30428	79.33	383.58
27	1	3.847	199.40	100.95	29255	80.04	365.51
27	2	3.827	199.80	101.00	27026	80.12	337.33

## Anexo 2: Resultados Módulo de Ruptura

<b>Proyecto:</b>	Tesis Universidad de Cuenca				
<b>Solicitado por:</b>	José Abad, Jorge Romero				
<b>Descripción de la probeta:</b>	Viguetas				
<b>Fecha:</b>	15/9/2016	<b>Edad de Rotura:</b>	28		

### Módulo de Ruptura

Distancia entre apoyos:	45.00	cm	Cargas en tercios medios
-------------------------	-------	----	--------------------------

Aplicaciones de carga					
Probeta	Carga Max.	Largo	Alto	Ancho	Módulo de ruptura
(orden confección)	(kgf)	(mm)	(cm)	(cm)	(kg/cm <sup>2</sup> )
1	5176.50	53.40	15.00	15.00	69.020
2	4876.90	53.30	15.10	15.20	62.906
3	5081.50	53.60	15.00	14.90	68.666
4	5142.00	53.70	14.90	15.00	69.020
5	4939.00	53.50	14.80	15.10	65.862
6	5418.00	53.40	14.90	15.10	71.765
7	4963.90	53.30	15.00	15.10	65.312
8	5046.00	56.40	14.80	15.00	68.189
9	4464.80	53.80	14.80	14.80	61.977
10	4304.00	53.60	15.00	15.00	57.387
11	4743.20	53.30	14.90	15.10	62.827
12	4876.30	53.70	14.90	15.20	63.743
13	4568.10	53.70	15.00	15.00	60.908
14	4715.60	53.50	15.00	15.10	62.045
15	4228.70	53.80	14.80	15.10	56.390
16	4873.80	53.40	15.20	15.40	60.841
17	4654.80	53.50	14.90	15.10	61.656
18	5007.90	53.60	15.00	15.20	65.027
19	5046.40	53.40	15.20	15.70	60.611
20	5028.40	53.30	14.90	15.40	64.035
21	4795.80	53.50	15.20	15.10	62.270
22	4931.40	53.70	14.90	15.00	66.194
23	4876.70	53.70	15.30	15.10	62.906
24	4713.80	53.40	15.00	15.20	61.208
25	4677.70	53.80	14.90	15.20	61.147
26	4870.70	53.80	14.90	15.10	64.516
27	4950.80	53.70	15.00	14.90	66.900

### Anexo 3: Resultados Módulo de Elasticidad


Proyecto:	Tesis Universidad de Cuenca		
Solicitado por:	José Abad, Jorge Romero		
Descripción de la probeta:	Viguetas		
Fecha:	15/9/2016	Edad de Rotura:	28
Módulo de Elasticidad			

Tratamiento (orden de confección)	Módulo de Elasticidad estático por deformaciones (kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de Elasticidad estático corregido por deformaciones (kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de Elasticidad dinámico (kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de Elasticidad estático por velocidad de propagación de onda (kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de Elasticidad estático por ecuación ACI (kg/cm <sup>2</sup> )
1	61674	313550	414103	343706	286128
2	82096	417375	349535	290114	285162
3	54515	277152	370450	307473	307458
4	42171	214396	349535	290114	283446
5	55806	283719	372220	308943	313379
6	52730	268079	384731	319327	304152
7	44771	227615	382931	317833	326548
8	47997	244017	351254	291541	317761
9	50897	258761	351254	291541	288109
10	69490	353288	393794	326849	275471
11	50420	256337	370450	307473	273852
12	45021	228886	384731	319327	301324
13	59032	300119	390156	323829	282043
14	50831	258427	373995	310416	302400
15	41843	212732	390156	323829	294976
16	47384	240901	373995	310416	300600
17	45301	230313	390156	323829	279697
18	52145	265104	368684	306007	287805
19	35365	179794	377557	313372	289857
20	43311	220193	377557	313372	275756
21	68364	347564	388343	322325	289617
22	41161	209262	402962	334459	282894
23	63568	323178	358175	297286	289239
24	67858	344991	377557	313372	288082
25	55299	281141	358175	297286	282225
26	51728	262983	377557	313372	295736
27	52660	267723	390156	323829	277331

Enlace en donde se encuentran las cargas, deformaciones, graficas esfuerzo deformación y relación de Poisson de cada ensayo:

[https://mega.nz/#!7kkgRbKA!5\\_D10RQFYnVsWOAz9Bd6b9bPQxv1fKMqvjeiiUSHEa8](https://mega.nz/#!7kkgRbKA!5_D10RQFYnVsWOAz9Bd6b9bPQxv1fKMqvjeiiUSHEa8)





**NORMA: ASTM C 469-02**

**PROYECTO: TESIS UNIVERSIDAD DE CUENCA**

**SOLICITA: Jose Abad, Diego Guaman, Julio Jurado, Jorge Romero**

**PROBETA # : 4**

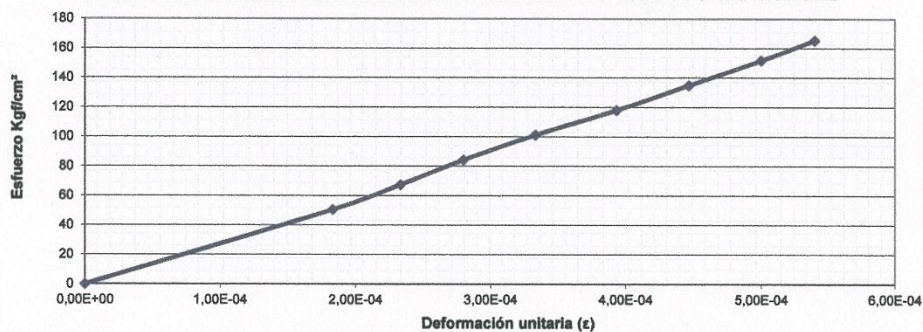
**FECHA: 11 DE OCTUBRE DEL 2016**

**EDAD: 28 DIAS**

### MODULO DE ELASTICIDAD DEL CONCRETO

Características de la probeta:					
Diámetro Probeta	15,05	cm	Carga Máxima	79578,00	Kgf
Altura Probeta	29,00	cm	Carga Máxima	780,39	KN
Area Probeta	177,90	cm <sup>2</sup>	Resistencia Máxima	43,87	Mpa
Longitud Inicial L <sub>0</sub>	15,00	cm	Resistencia Máxima	447,33	Kgf/cm <sup>2</sup>

Aplicaciones de carga					
LECURA DEFORMIMETRO	CARGA	CARGA	ESFUERZO	ESFUERZO	DEFORMACION UNITARIA LONGITUDINAL
(x0.001 mm)	(Kgf)	(KN)	MPa	(Kgf/cm <sup>2</sup> )	
0	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00E+00
28	9000,00	88,26	4,961	50,59	1,83E-04
35	12000,00	117,68	6,615	67,46	2,33E-04
42	15000,00	147,10	8,269	84,32	2,80E-04
50	18000,00	176,52	9,923	101,18	3,33E-04
59	21000,00	205,94	11,577	118,05	3,93E-04
67	24000,00	235,36	13,230	134,91	4,47E-04
75	27000,00	264,78	14,884	151,77	5,00E-04
81	29413,00	288,44	16,214	165,34	5,40E-04




Resumen de datos	
Esfuerzo a 50 millonésimas de deformación	
S <sub>1</sub> =	13,80 Kgf/cm <sup>2</sup>
Esfuerzo al 40% de la Resistencia	
S <sub>2</sub> =	165,34 Kgf/cm <sup>2</sup>
Deformación Unitaria Longitudinal por S <sub>2</sub>	
ξ <sub>1</sub> =	5,40E-04

MODULO DE ELASTICIDAD	
E=	309.263,36 Kgf/cm <sup>2</sup>



Manuel Davila 1-52 y Av. Remigio Crespo / Telefono 07 2 884-121 Telefax: 07 2 814-0710 **Ing. Pablo Esteban Vélez Dávila**  
Cuenca - Ecuador / Email: labscon@outlook.com





**NORMA: ASTM C 469-02**

**PROYECTO: TESIS UNIVERSIDAD DE CUENCA**

**SOLICITA: Jose Abad, Diego Guaman, Julio Jurado, Jorge Romero**

**PROBETA # : 5**

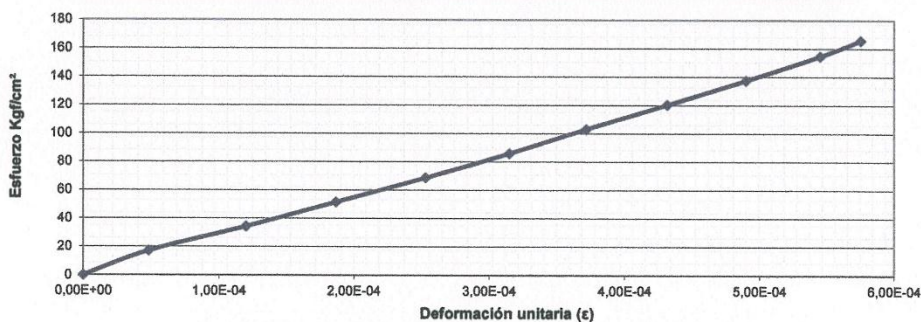
**FECHA: 11 DE OCTUBRE DEL 2016**

**EDAD: 28 DIAS**

### MODULO DE ELASTICIDAD DEL CONCRETO

Características de la probeta:					
Diámetro Probeta	15,05	cm	Carga Máxima	88083,00	Kgf
Altura Probeta	30,00	cm	Carga Máxima	863,80	KN
Area Probeta	177,90	cm <sup>2</sup>	Resistencia Máxima	48,56	Mpa
Longitud Inicial L <sub>0</sub>	15,00	cm	Resistencia Máxima	495,14	Kgf/cm <sup>2</sup>

Aplicaciones de carga					
LECURA DEFORMIMETRO (x0.001 mm)	CARGA (Kgf)	CARGA (KN)	ESFUERZO MPa	ESFUERZO (Kgf/cm <sup>2</sup> )	DEFORMACION UNITARIA LONGITUDINAL
0	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00E+00
7	3059,15	30,00	1,686	17,20	4,83E-05
18	6118,30	60,00	3,373	34,39	1,20E-04
28	9177,45	90,00	5,059	51,59	1,87E-04
38	12236,59	120,00	6,746	68,79	2,53E-04
47	15295,74	150,00	8,432	85,98	3,15E-04
56	18354,89	180,00	10,118	103,18	3,72E-04
65	21414,04	210,00	11,805	120,37	4,32E-04
74	24473,19	240,00	13,491	137,57	4,90E-04
82	27532,34	270,00	15,178	154,77	5,45E-04
86	29478,98	289,09	16,251	165,71	5,75E-04




Resumen de datos	
<u>Esfuerzo a 50 millonésimas de deformación</u>	
S <sub>1</sub> =	18,02 Kgf/cm <sup>2</sup>
<u>Esfuerzo al 40% de la Resistencia</u>	
S <sub>2</sub> =	165,71 Kgf/cm <sup>2</sup>
<u>Deformación Unitaria Longitudinal por S<sub>2</sub></u>	
ξ <sub>1</sub> =	5,75E-04

MODULO DE ELASTICIDAD	
E =	281.314,13 Kgf/cm <sup>2</sup>

Manuel Davila 1-52 y Av. Remigio Crespo / Telefono 07 2 884-121 Telefax: 07 2 814-07  
Cuenca - Ecuador / Email: labscon@outlook.com

  
**LABSCON**  
 Laboratorio de Suelos y Concretos  
 Diseño Control de Calidad y Fiscalización  
 Ing. Pablo Esteban Vélez Dávila



**NORMA: ASTM C 469-02**

**PROYECTO: TESIS UNIVERSIDAD DE CUENCA**

**SOLICITA: Jose Abad, Diego Guaman, Julio Jurado, Jorge Romero**

**PROBETA # : 6**

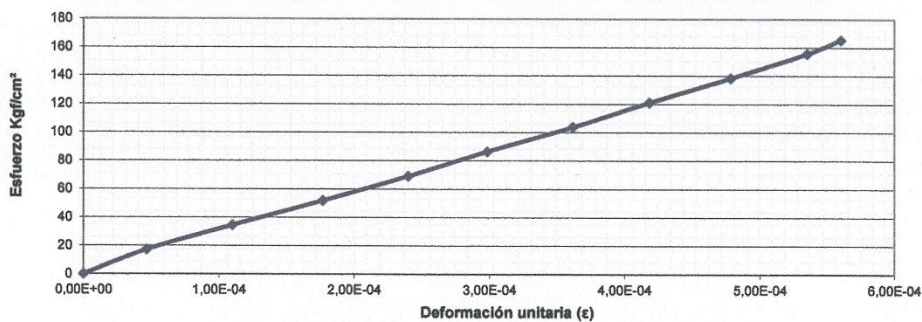
**FECHA: 11 DE OCTUBRE DEL 2016**

**EDAD: 28 DIAS**

### MODULO DE ELASTICIDAD DEL CONCRETO

Características de la probeta:					
Diámetro Probeta	15,00	cm	Carga Máxima	87640,00	Kgf
Altura Probeta	29,00	cm	Carga Máxima	859,45	KN
Area Probeta	176,72	cm <sup>2</sup>	Resistencia Máxima	48,64	Mpa
Longitud Inicial L <sub>0</sub>	15,00	cm	Resistencia Máxima	495,94	Kgf/cm <sup>2</sup>

Aplicaciones de carga					
LECURA DEFORMIMETRO (x0.001 mm)	CARGA (Kgf)	CARGA (KN)	ESFUERZO MPa	ESFUERZO (Kgf/cm <sup>2</sup> )	DEFORMACION UNITARIA LONGITUDINAL
0	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00E+00
7	3059,15	30,00	1,698	17,31	4,67E-05
17	6118,30	60,00	3,395	34,62	1,10E-04
27	9177,45	90,00	5,093	51,93	1,77E-04
36	12236,59	120,00	6,791	69,24	2,40E-04
45	15295,74	150,00	8,488	86,56	2,98E-04
54	18354,89	180,00	10,186	103,87	3,62E-04
63	21414,04	210,00	11,884	121,18	4,18E-04
72	24473,19	240,00	13,581	138,49	4,78E-04
80	27532,34	270,00	15,279	155,80	5,35E-04
84	29246,48	286,81	16,230	165,50	5,60E-04



Resumen de datos	
<u>Esfuerzo a 50 millonésimas de deformación</u>	
S <sub>1</sub> =	18,22 Kgf/cm <sup>2</sup>
<u>Esfuerzo al 40% de la Resistencia</u>	
S <sub>2</sub> =	165,50 Kgf/cm <sup>2</sup>
<u>Deformación Unitaria Longitudinal por S<sub>2</sub></u>	
ξ <sub>1</sub> =	5,60E-04

MODULO DE ELASTICIDAD	
E =	288.785,96 Kgf/cm <sup>2</sup>

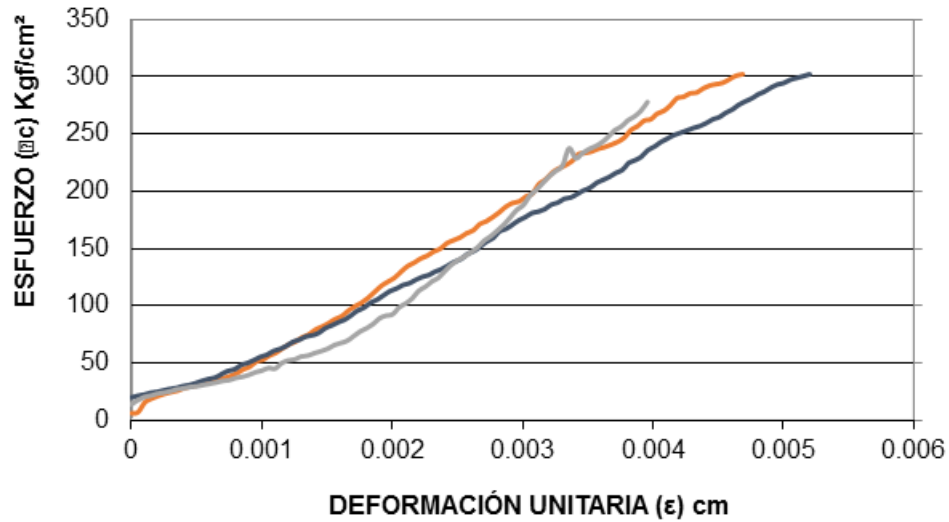
  
 Laboratorio de Suelos y Concretos  
 Diseño Control de Calidad y Fiscalización  
 Ing. Pablo Esteban Vélez Dávila

Manuel Davila 1-52 y Av. Remigio Crespo / Telefono 07 2 884-121 Telefax: 07 2 814-070  
 Cuenca - Ecuador / Email: labscon@outlook.com

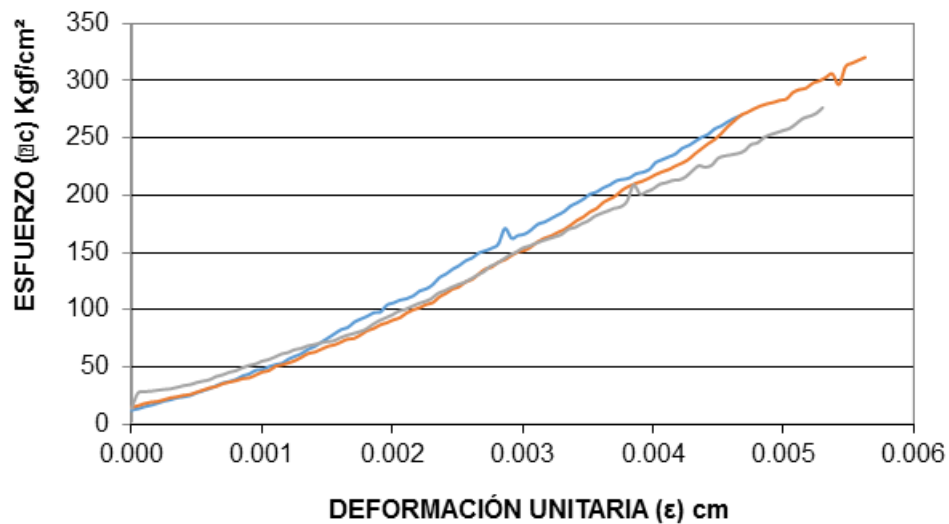


#### Anexo 4: Gráficas de Esfuerzo – Deformación de cada mezcla

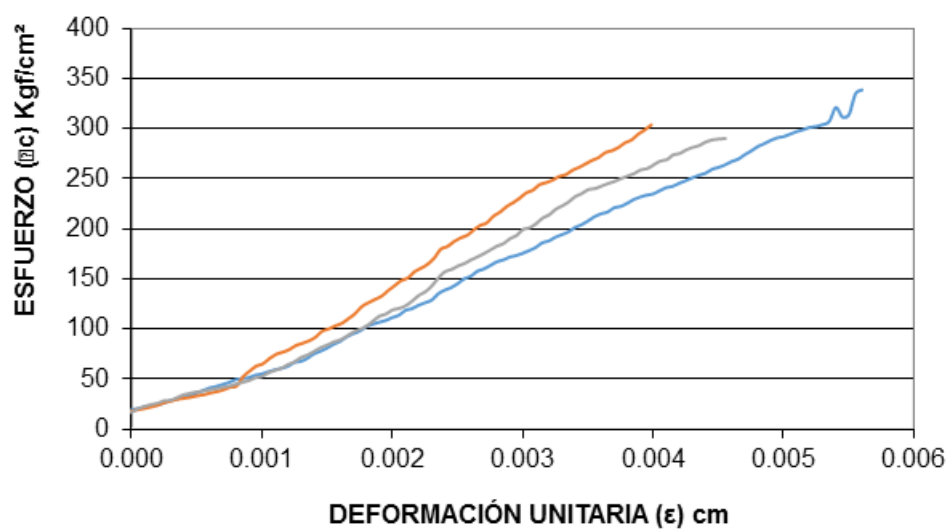
Mezcla 1: mezcla base sin la inclusión de fibras.



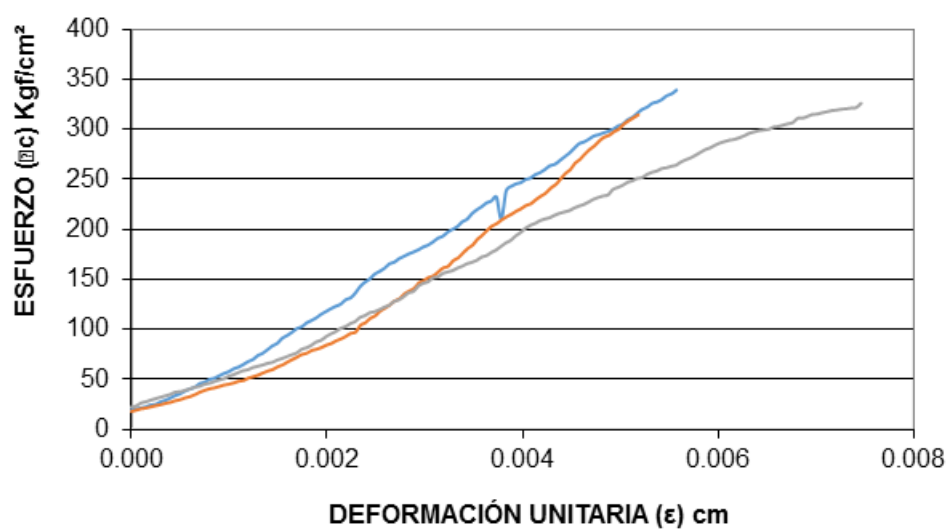
Mezcla 2: mezcla base con la inclusión de 2.25 kg de fibra comercial por metro cúbico.



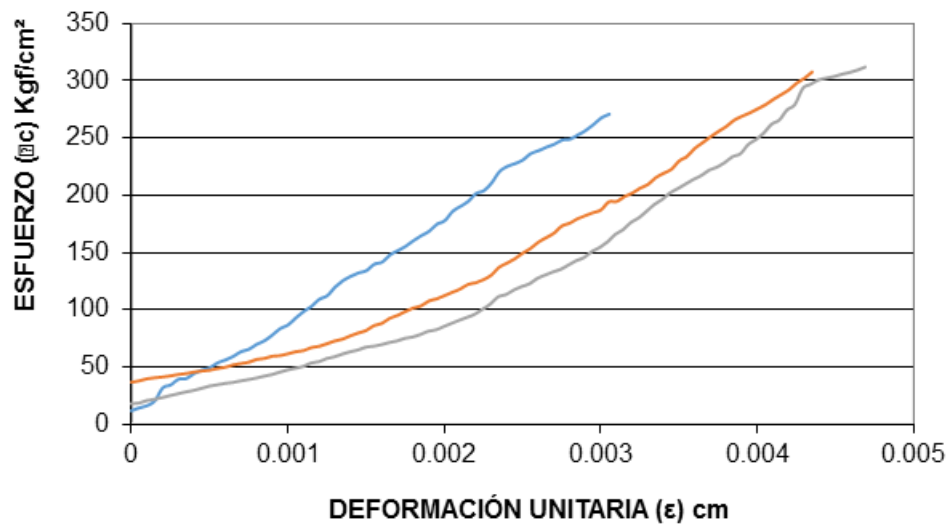
Mezcla 3: mezcla base con la inclusión de 2.25 kg de fibra reciclada por metro cúbico.



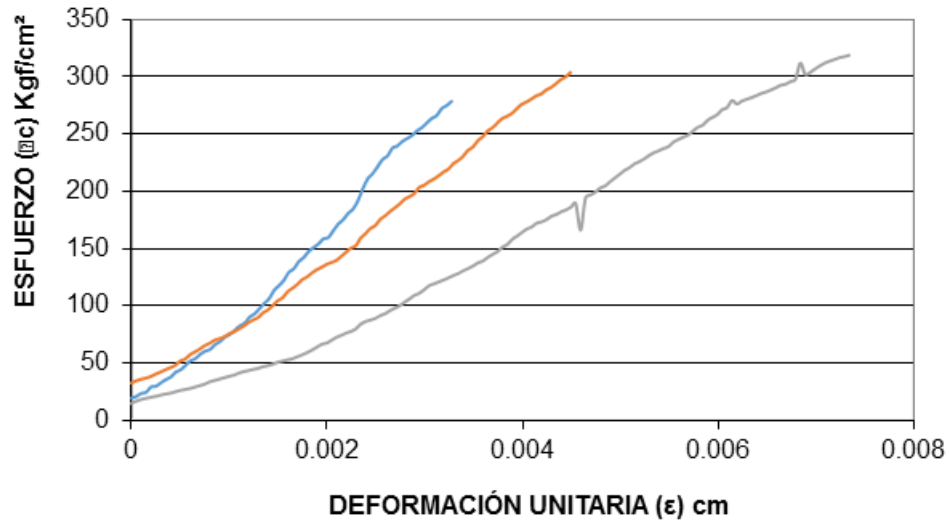
Mezcla 4: mezcla base con la inclusión de 4.50 kg de fibra comercial por metro cúbico.



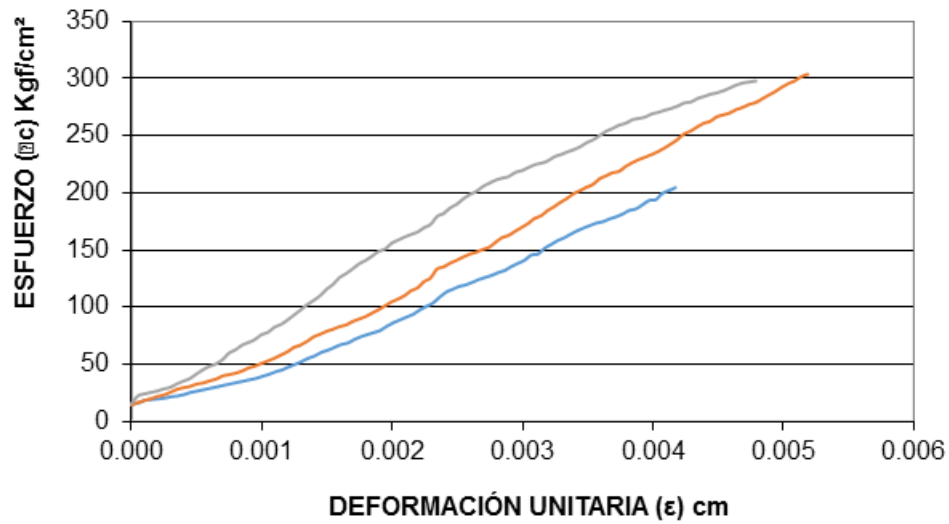
Mezcla 5: mezcla base con la inclusión de 4.50 kg de fibra reciclada por metro cúbico.



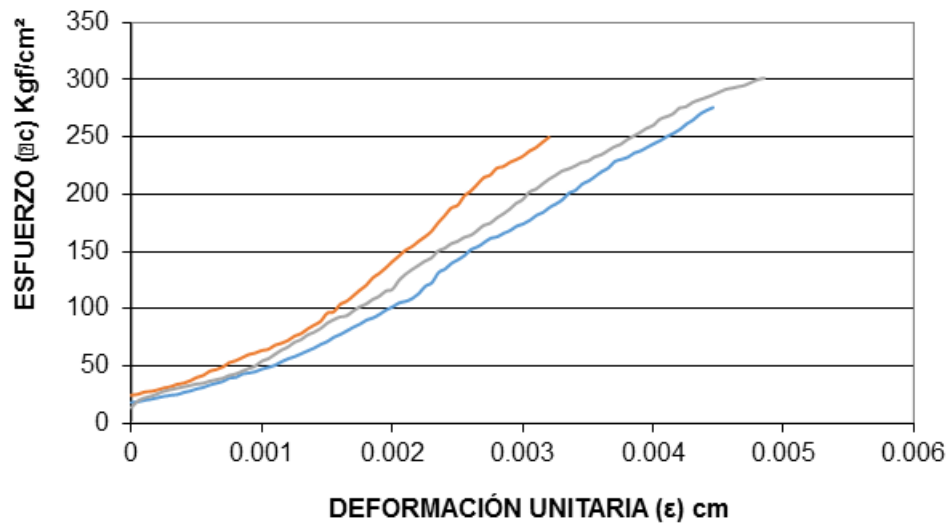
Mezcla 6: mezcla base con la inclusión de 2.25 kg de fibra comercial y 2.25 kg de fibra reciclada por metro cúbico.



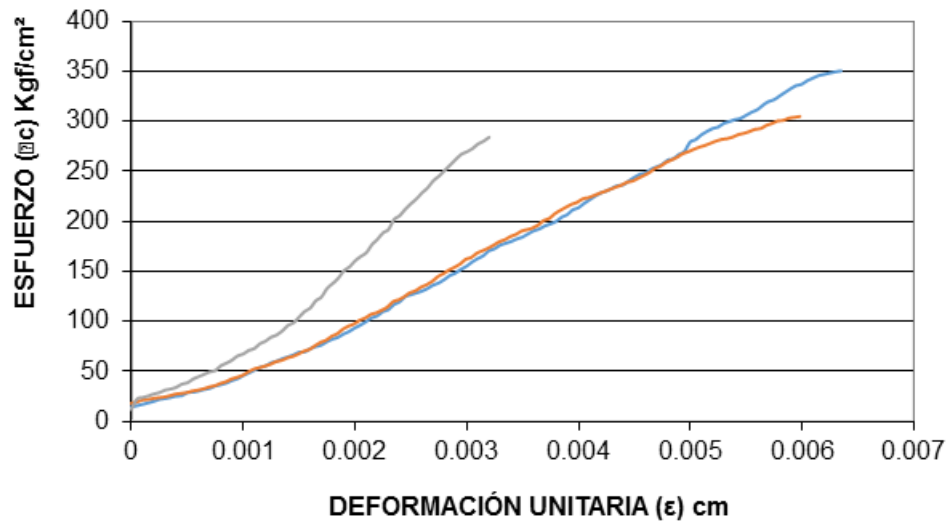
Mezcla 7: mezcla base con la inclusión de 4.50 kg de fibra comercial y 2.25 kg de fibra reciclada por metro cúbico.



Mezcla 8: mezcla base con la inclusión de 2.25 kg de fibra comercial y 4.50 kg de fibra reciclada por metro cúbico.



Mezcla 9: mezcla base con la inclusión de 4.50 kg de fibra comercial y 4.50 kg de fibra reciclada por metro cúbico.





## Anexo 5: Resultados Velocidad de Propagación de Onda

<b>Proyecto:</b>	Tesis Universidad de Cuenca
<b>Solicitado por:</b>	José Abad, Jorge Romero
<b>Descripción de la probeta:</b>	Viguetas (velocidad de ultrasonido)
<b>Fecha:</b>	15/9/2016
<b>Edad de Rotura:</b>	28

### Velocidad de Ultrasonido Vp (Separación entre electrodos 15 cm)

Tratamiento (orden de confección)	Tiempo (micro s)	Velocidad (m/s)
1	33.90	4430
2	36.9	4070
3	35.8	4190
4	36.9	4070
5	35.7	4200
6	35.1	4270
7	35.2	4260
8	36.8	4080
9	36.8	4080
10	34.7	4320
11	35.8	4190
12	35.1	4270
13	34.9	4300
14	35.6	4210
15	34.9	4300
16	35.6	4210
17	34.9	4300
18	35.9	4180
19	35.5	4230
20	35.5	4230
21	35.0	4290
22	34.3	4370
23	36.4	4120
24	35.5	4230
25	36.4	4120
26	35.5	4230
27	34.9	4300



## Anexo 6: Resultados Relación de Poisson

<b>Proyecto:</b>	Tesis Universidad de Cuenca
<b>Solicitado por:</b>	José Abad, Jorge Romero
<b>Descripción de la probeta:</b>	Cilindros (10cm diámetro x 20cm alto)
<b>Fecha:</b>	15/9/2016
<b>Edad de Rotura:</b>	28

### Relación de Poisson

Tratamiento (orden de confección)	Relación de Poisson (por deformaciones)
1	0.08
2	0.11
3	0.04
4	0.04
5	0.06
6	0.04
7	0.08
8	0.06
9	0.05
10	0.10
11	0.04
12	0.04
13	0.06
14	0.08
15	0.06
16	0.07
17	0.04
18	0.07
19	0.04
20	0.04
21	0.06
22	0.03
23	0.04
24	0.07
25	0.07
26	0.05
27	0.08